



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE LA TOMA Y EL ANÁLISIS DE
DATOS EN ESPECTROSCOPIA TERAHERZIO

Íñigo Tanco Urzaiz

Daniel Lasasa Medarde

Pamplona, 18 de Noviembre de 2011

Índice

1. Introducción.	3
2. Objetivos.	5
3. Antecedentes y estado del arte.	6
3.1 Generación de pulsos Terahertzio.	6
3.2 Detección de pulsos Terahertzio.	7
3.3 Espectroscopio.	9
3.4 Análisis de datos.	13
3.5 Determinación del grosor de las muestras.	15
4. Desarrollo del trabajo.	17
4.1 Implementación del sistema.	17
4.2 Programa Principal.	18
4.3 Programa Busca-Pulsos.	24
4.4 Calculo de coeficientes y del grosor de la muestra.	26
4.5 Procesado de señal.	31
4.6 Programa ‘Coeficientes’.	36
4.7 Calibración del sistema.	37
4.8 Efectos de la temperatura.	39
5. Estudio económico.	40
6. Conclusiones.	41
7. Manual de usuario.	43
7.1 Manual de usuario programa Principal.	43
7.2 Manual de usuario del programa Busca-Pulsos.	47
7.3 Manual de usuario del programa ‘Coeficientes’.	50
8. Manual del programador.	53
8.1 Manual del programador del programa Principal.	53
8.2 Manual del programador del programa Busca-Pulsos.	57
8.3 Manual del programador del programa ‘Coeficientes’.	62
9. Bibliografía.	69
10. Anexos.	70
10.1 Anexo I. Gráficas y resultados.	70
10.2 Anexo II. Especificaciones del Lock-In Amplifier.	78
10.3 Anexo III. Especificaciones de la Línea de Desplazamiento.	82

1. Introducción

La región Teraherzio ha sido una de las últimas del espectro electromagnético en ser explorada. Las dificultades para la generación y detección de ondas, así como la alta absorción atmosférica en ese rango de frecuencias fueron la causa de este retraso.

La región Teraherzio está definida aproximadamente entre 0.1 y 10 THz, entre la región de Microondas y la región Infrarroja.

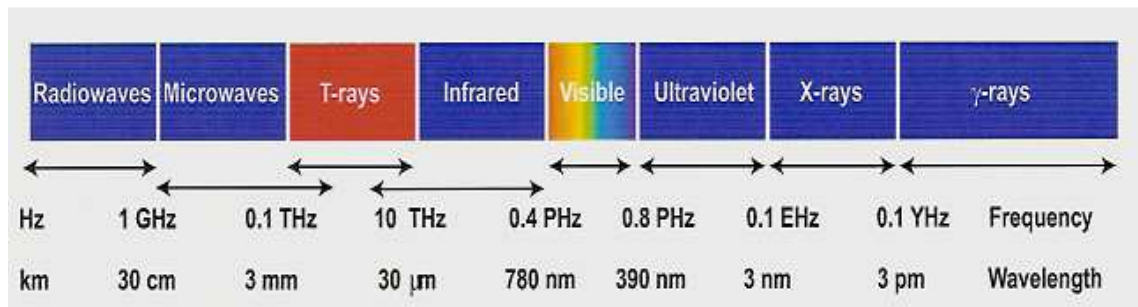


Figura 1. Espectro electromagnético.

Actualmente, gracias al desarrollo de láseres ultrarrápidos, los problemas para la generación y detección de pulsos Teraherzio han sido resueltos. Básicamente existen dos métodos de generación y detección basados en láseres ultrarrápidos; el primero, utilizando la fotocorriente transitoria en un material semiconductor, y la segunda, basada en efectos no-lineales a través de rectificación óptica en cristales electro-ópticos.

La radiación Teraherzio es considerada no invasiva, debido a la baja energía de los fotones. Ha sido demostrado que las sustancias secas, no polares y no metálicas, como el papel, cartón y plásticos son transparentes a la radiación Teraherzio.

La radiación Teraherzio tiene un gran número de aplicaciones en diferentes campos [8].

La seguridad y la defensa son las principales áreas de aplicación de los sistemas basados en ondas Teraherzio. Existen cámaras Teraherzio que pueden detectar objetos sospechosos debajo de la ropa desde unos 25 metros de distancia. Los cristales moleculares y biomoléculas presentan picos de absorción propios de cada sustancia. Esta propiedad, unido al hecho de que papel, cartón y plásticos son transparentes a la radiación Teraherzio, permite la detección de explosivos y de drogas ilegales incluso en sobres, bolsas o maletines.

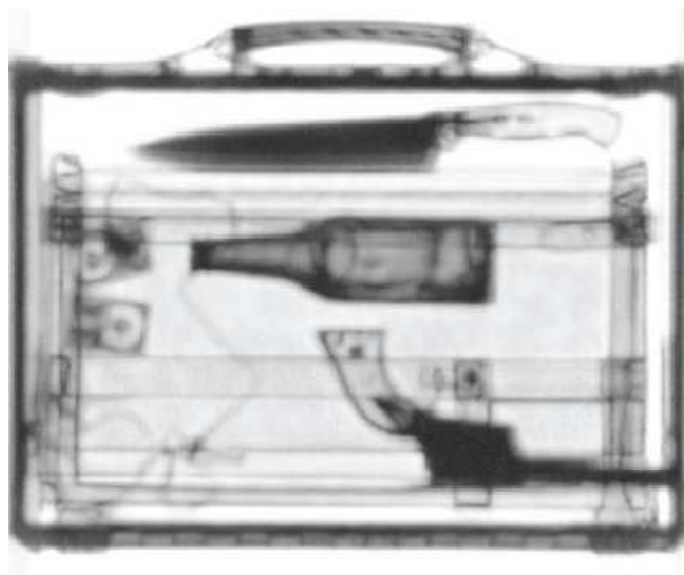


Figura 2. Imagen del interior de un maletín. Se puede apreciar un cuchillo, una botella y una pistola

Además, los objetos metálicos como pistolas o cuchillos pueden ser detectados por su silueta. El principal problema de estas aplicaciones está en el tiempo necesario para obtener las imágenes de los objetos analizados.

También podemos encontrar aplicaciones en la industria alimentaria. La detección de cuerpos extraños en comestibles se realiza con detectores de metales y rayos X. El primer método solamente es posible detectar metales y el segundo se trata de una radiación ionizante, por lo que su uso está restringido. La radiación Teraherzio podría sustituir a estos métodos en el control de calidad en la industria alimentaria. Hasta ahora en los experimentos realizados solo se ha logrado penetrar un centímetro por lo que no es todavía práctico para casos reales.

La radiación Terhaerzio también tiene aplicaciones en la industria farmacéutica. No solo es posible detectar diferentes sustancias debido a sus picos de absorción, sino diferentes morfologías de una misma sustancia son también detectables. Otra aplicación es la detección del nivel de hidratación de ciertas sustancias o su concentración en mezclas.

En la industria de los plásticos y polímeros también se pueden encontrar varias aplicaciones. Control del proceso de fabricación, control de calidad, determinación de la humedad o la transición vítrea de los polímeros.

En el futuro de la espectroscopia Teraherzio se desarrollaran experimentos para solucionar los problemas que aún presenta esta técnica, como por ejemplo aumentar la potencia de penetración de las ondas. También se ampliaría el ancho de banda de los sistemas.

En el apartado tecnológico, los láseres con pulsos de duración de unos pocos femtosegundos bajaran de precio. Uno de los mayores inconvenientes de la espectroscopia Teraherzio es la velocidad en la obtención de las imágenes. La imagen del maletín, por ejemplo, necesita varias decenas de minutos para ser tomada. La velocidad de adquisición de las imágenes aumentará por lo que también aumentará el rango de las aplicaciones. Otra predicción es el uso de fibra óptica en los sistemas comerciales, reduciendo el uso de lentes y espejos, lo que reducirá el tamaño y el peso de dichos sistemas.

2. Objetivos

Este proyecto consiste básicamente en la implementación de un sistema de espectroscopia utilizando radiación Teraherzio. El principal objetivo es por tanto, poner en funcionamiento dicho sistema para después ser utilizado.

Primero se estudiarán las bases de la espectroscopia Teraherzio, tanto el sistema, como el procesado de los datos para obtener los parámetros deseados. Después se montará el sistema en el laboratorio y se desarrollara el software necesario para el control del sistema y la toma de datos.

También será necesario un programa que procese los datos guardados por el sistema y obtenga los coeficientes de las sustancias. Este mismo programa determinará el grosor de la muestra, que es necesario para el cálculo de los parámetros.

Una vez construido el sistema y los programas necesarios, se calibrará el sistema con sustancias cuyo índice de refracción y coeficiente de absorción son conocidos en el rango de frecuencias 0-3 THz. Se compararán los resultados obtenidos con los teóricos.

Se realizara un procesado de señal para mejorar la presentación de los coeficientes eliminando efectos parásitos propios de la medida.

Por último, se comprobaran experimentalmente los efectos de la temperatura en la medida de los coeficientes.

Resumiendo, los objetivos de este proyecto son:

1. Estudiar y comprender un sistema de espectroscopia Teraherzio
2. Implementar el sistema en el laboratorio
3. Desarrollar el software necesario para el control del sistema y la adquisición de datos
4. Procesado de los datos para obtener los coeficientes deseados
5. Calibración del sistema
6. Post-procesado de señal para mejorar la presentación de los coeficientes
7. Comprobar el efecto de la temperatura

3. Antecedentes y estado del arte.

3.1 Generación

El método utilizado para la generación de pulsos Teraherzio está basado en las corrientes transitorias que se crean en los semiconductores [1]. Para generar pulsos es necesario un laser ultrarrápido, una antena y una lente semiesférica.

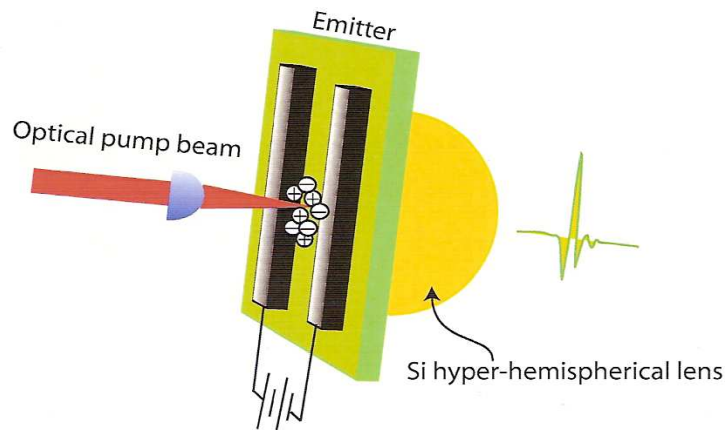


Figura 3. Generación de pulso Teraherzio

La antena, que está formada por semiconductor en el cual encontramos dos líneas metálicas separadas entre sí por unos 20 μm que son utilizadas para crear un campo eléctrico en el semiconductor al conectar una fuente de voltaje entre ellas.

El láser ilumina el semiconductor. Al tener una energía superior a la energía de gap del semiconductor, pares electrón-hueco son generados. Los pares electrón-hueco son acelerados por el campo eléctrico creado por las líneas metálicas y se recombinan en un tiempo constante dado por el tiempo de vida de los portadores del semiconductor. De acuerdo con las leyes de Maxwell, una corriente eléctrica genera la emisión de radiación electromagnética con dependencia temporal del campo eléctrico. Entonces, la corriente de pares electrón-hueco se comporta como una fuente de pulsos Teraherzio. La lente semiesférica es añadida para acoplar el pulso en el espacio.

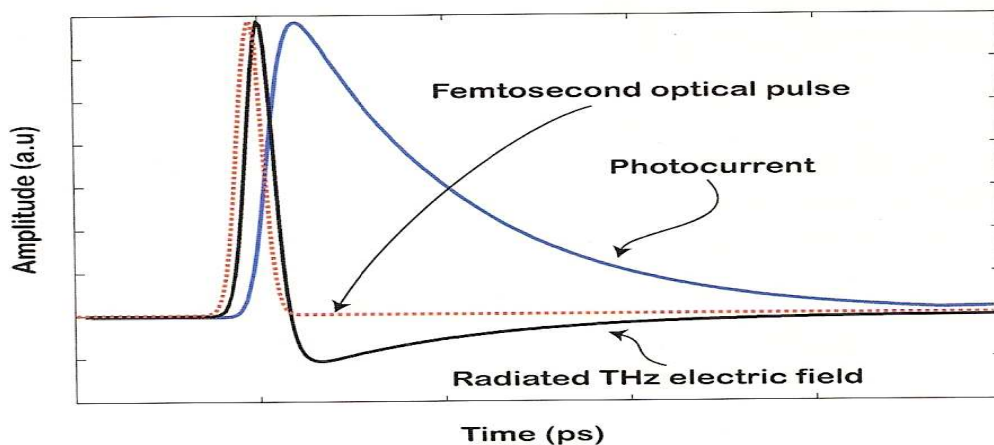


Figura 4. Pulso del laser, Pulso Teraherzio emitido y corriente eléctrica en el semiconductor.

3.2 Detección

Los principios de generación y detección de pulsos Teraherzios son muy similares [1]. El detector está formado por los mismos elementos que el emisor, pulso laser incidente, antena y lente.

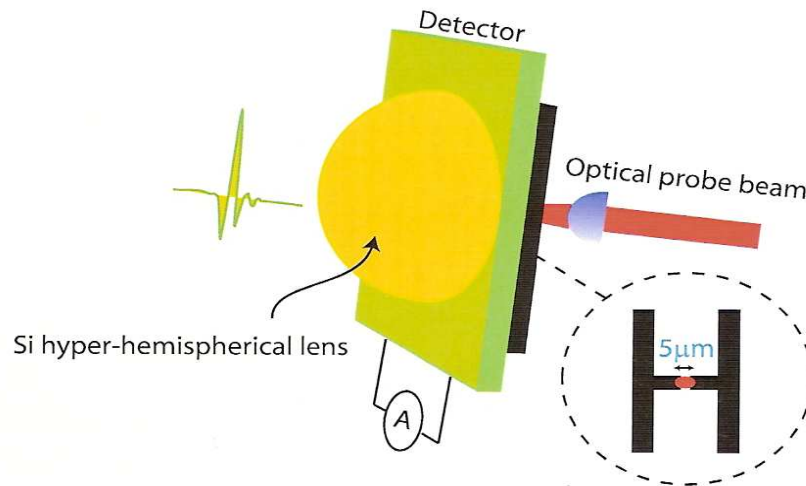


Figura 5. Detector de pulsos Teraherzio

En este caso la antena está formada por un semiconductor con una H-estructura metálica, como se puede apreciar en la imagen anterior. La distancia mínima de entre las líneas metálicas es de unos 5 μm . Las líneas metálicas están conectadas a un amperímetro.

El laser ilumina el semiconductor y los pares electrón-hueco son generados. En este caso, los pares electrón-hueco son acelerados por el campo eléctrico del pulso que estamos detectando. Los pares electrón hueco logran alcanzar las líneas metálicas al ser su separación menor que en el caso anterior, por lo que se genera una corriente eléctrica que puede ser medida por el amperímetro. La corriente medida es proporcional a la radiación Teraherzio incidente.

Los portadores electrón-hueco son generados solamente cuando el láser incide en el semiconductor. Como el pulso láser es mucho más corto que el pulso Teraherzio, los portadores electrón-hueco son acelerados por un campo eléctrico prácticamente constante.

Este campo eléctrico constante es el valor del pulso en un instante del tiempo. Por tanto, la corriente generada es proporcional a este campo eléctrico, por lo que obtendríamos una muestra del pulso.

Para completar el muestreo del pulso necesitamos una línea de retardo para mover el pulso laser con respecto del pulso Teraherzio para obtener muestras de posiciones diferentes.



Figura 6. Proceso de muestreo del pulso

3.3 Espectroscopio

El espectroscopio Teraherzio con el que vamos a trabajar presenta la estructura típica de este tipo de sistema [2].

El láser, que emite pulsos de unos 20 femtosegundos de duración, es dividido en dos haces diferentes mediante un beamsplitter. Un haz se utiliza en la generación de los pulsos Teraherzio (haz de bombeo) y el otro en la detección de dichos pulsos (haz de prueba).

La línea de desplazamiento con un espejo varía la diferencia de longitud de ambos haces, lo que permite cambiar la posición de muestreo del pulso Teraherzio. Se realiza el muestreo visto en el apartado anterior. Cada posición de la línea de desplazamiento se corresponde con un punto temporal del pulso Teraherzio.

El haz de bombeo, utilizado en la emisión, es modulado con una frecuencia de 2 KHz para que la corriente generada en el detector pueda ser demodulada por el Lock-In Amplifier. Este instrumento funciona solamente en un rango de 0 a 102 KHz, mientras que el laser emite pulsos con una frecuencia de 80 MHz. La frecuencia de modulación del haz de bombeo actúa como frecuencia de referencia para el Lock-In Amplifier.

Los espejos hiperbólicos permiten concentrar la radiación Teraherzio en el centro de la muestra.

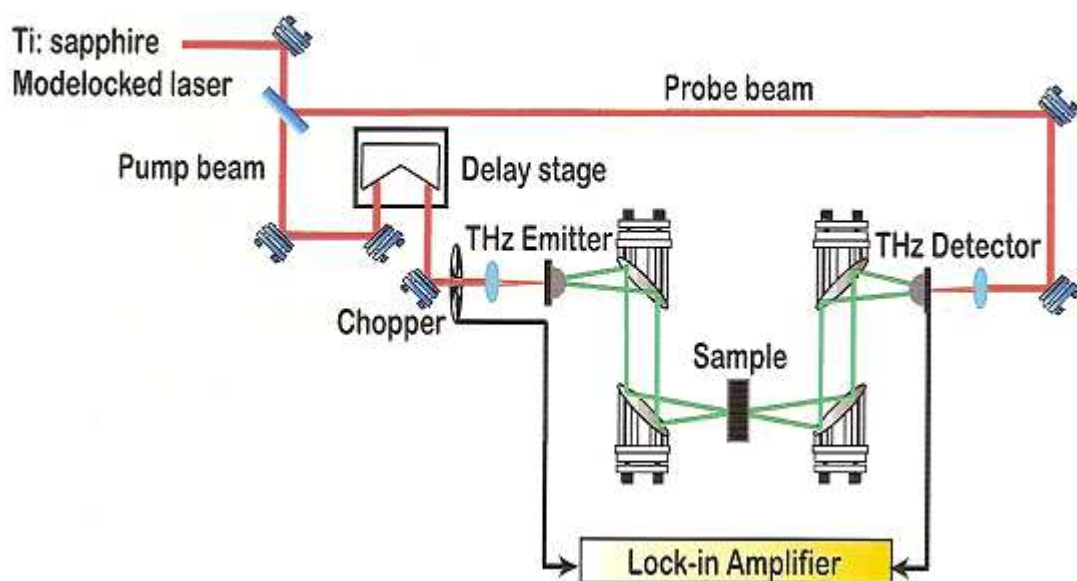


Figura 7. Esquema de un espectroscopio Teraherzio

Línea de retardo

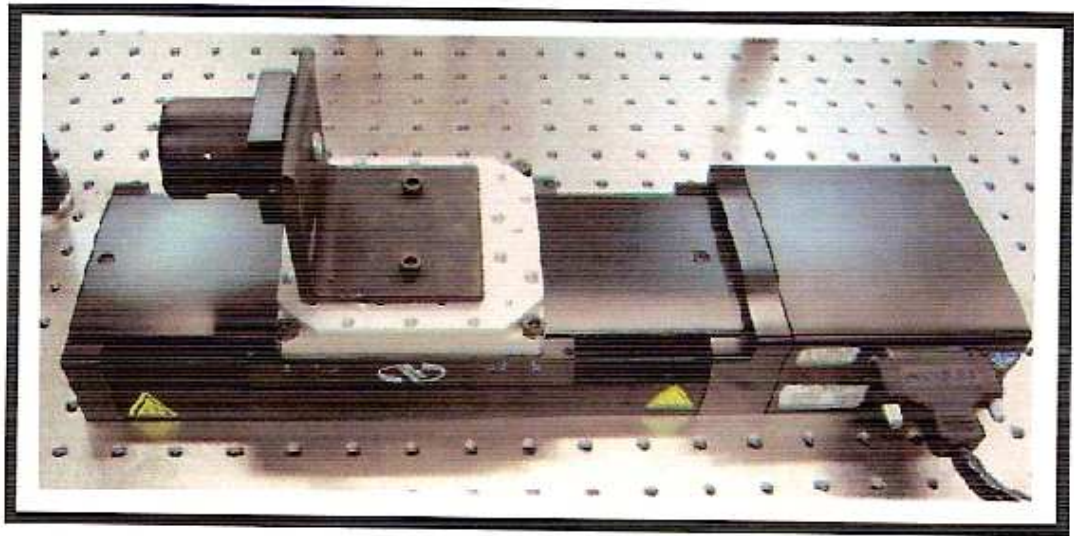


Figura 8. Línea de desplazamiento con espejo

La línea de retardo consiste en una línea de desplazamiento con un espejo. Sirve para variar la diferencia de longitud de los dos haces del láser cambiando la posición de muestreo. La frecuencia de muestreo depende del tamaño los desplazamientos de los objetos.

Lock-In Amplifier



Figura 9. Lock-In Amplifier

El Lock-In Amplifier mide la corriente eléctrica generada en el detector. Esta corriente tiene una componente frecuencial a la frecuencia modulada por el modulador óptico. El Lock-In Amplifier actúa como un detector coherente con una frecuencia de referencia suministrada por el modulador óptico.

La potencia de la señal que tenemos que detectar esta normalmente por debajo del nivel de ruido, por lo que la detección coherente es necesaria. Este ruido está generado por ruido blanco, ruido q/f y fluctuaciones del laser.

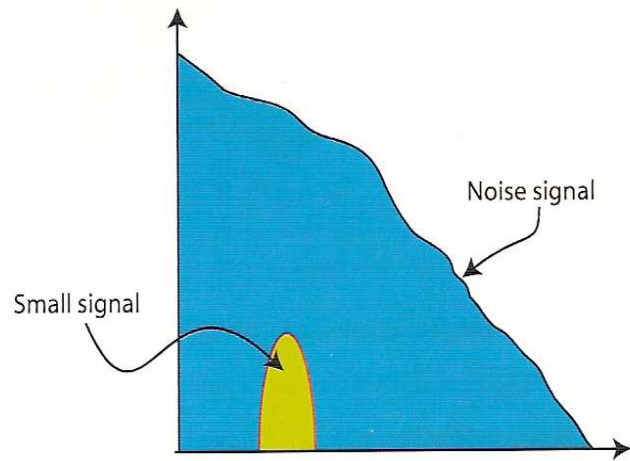


Figura 10. Señal oculta por el ruido

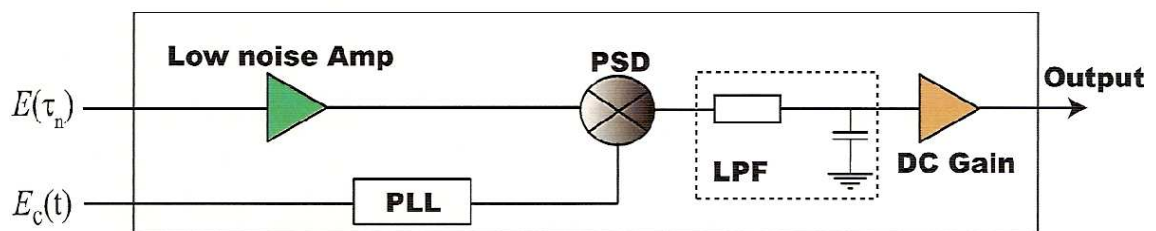


Figura 11. Esquema del Lock-In Amplifier

El Lock-In Amplifier opera como un multiplicador de frecuencia y un filtro paso bajo. En las entradas del multiplicador tenemos la corriente generada en el detector y una señal de referencia con la misma frecuencia que la anterior, por tanto, a la salida del multiplicador tenemos la señal de interés en banda base. El filtro paso bajo elimina los armónicos generados por el multiplicador para quedarnos solamente con la banda base. Finalmente la señal es amplificada.

Modulador óptico

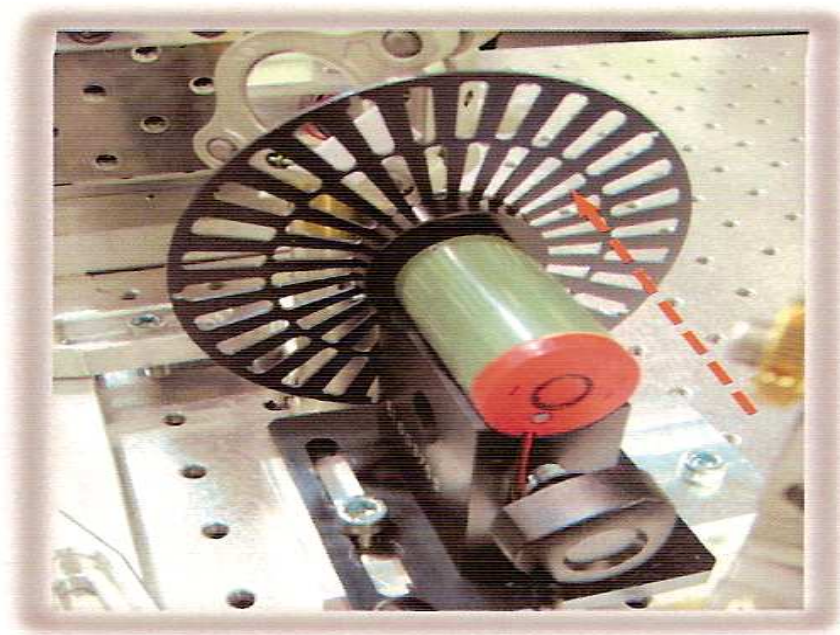


Figura 12. Modulador óptico

Modula la los pulsos del haz de bombeo a una frecuencia de unos 2 KHz. Esta frecuencia servirá de referencia para el Lock-In Amplifier.

Antenas

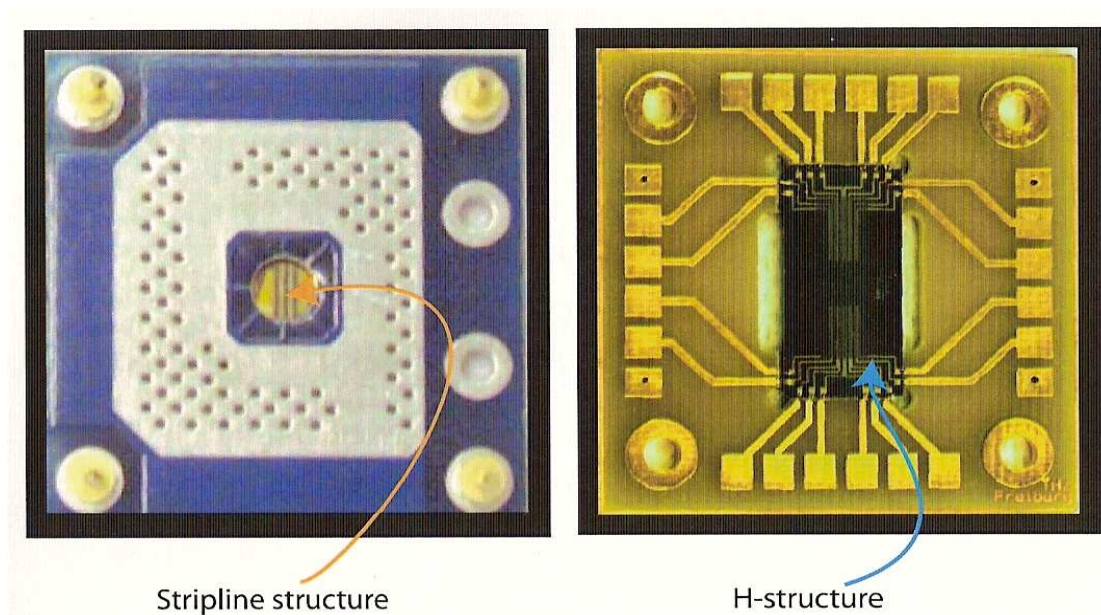


Figura 13. Antenas. La antena de la izquierda es la antena emisora de los pulsos y la antena de la derecha es la de recepción.

Las antenas han sido fabricadas en la universidad de Freiburg (Alemania).

3.4 Análisis de datos

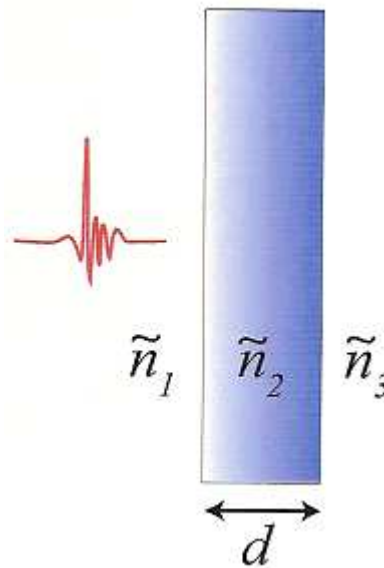


Figura 14. Esquema de la muestra y el pulso Teraherzio incidente.

Para obtener los parámetros del material es necesario realizar dos medidas, una sin el material, como referencia, y la otra con el material. Las componentes frecuenciales de los pulsos se obtienen realizando el cálculo de la FFT.

En el transcurso de extracción de los parámetros se supone que la muestra es homogénea y suficientemente gruesa para evitar reflexiones internas. Además, se supone también que la radiación Teraherzio es normal a la muestra [1].

El campo eléctrico transmitido a través de la muestra es:

$$E_{sample}(\omega) = T_{12}(\omega) \cdot P_2(\omega, d) \cdot T_{21}(\omega) \cdot A(\omega) \cdot FP(\omega) \quad (1)$$

Dónde T_{ab} es el coeficiente de transmisión del medio a al medio b,

$$T_{ab}(\omega) = \frac{\tilde{n}_a(\omega)}{\tilde{n}_a(\omega) + \tilde{n}_b(\omega)} \quad (2)$$

R_{ab} es el coeficiente de reflexión de a a b,

$$R_{ab}(\omega) = \frac{\tilde{n}_a(\omega) - \tilde{n}_b(\omega)}{\tilde{n}_a(\omega) + \tilde{n}_b(\omega)} \quad (3)$$

$P_a(d)$ es el coeficiente de propagación en el medio a lo largo de una distancia d ,

$$P_a(\omega, d) = \exp\left(-j \frac{\tilde{n}_a \omega d}{c}\right) \quad (4)$$

FP es el término de reflexiones Fabry-Perot, puede ser aproximado por:

$$FP(\omega) = \frac{1}{1 - R_{21} \cdot R_{23} \cdot \exp\left(-j \frac{\tilde{n}_2 \omega d}{c}\right)} \quad (5)$$

Este término es importante solamente en muestras delgadas, así que, para evitar complicaciones, se asume que las muestras a analizar son lo suficientemente gruesas para eliminar el término de Fabry-Perot.

El campo eléctrico de los pulsos a través del aire es:

$$E_{reference}(\omega) = P_{air}(\omega, d) \cdot A(\omega) \quad (6)$$

El cociente entre los campos eléctricos de los pulsos a través de la muestra y a través del aire es:

$$\frac{E_{sample}(\omega)}{E_{reference}(\omega)} = \frac{T_{12}(\omega) \cdot P_2(\omega, d) \cdot T_{21}(\omega) \cdot FP(\omega)}{P_{air}(\omega, d)} = \rho e^{-j\theta} \quad (7)$$

Al eliminar el término Fabry-Perot, se puede escribir como:

$$\frac{E_{sample}(\omega)}{E_{reference}(\omega)} = \frac{4 \cdot \tilde{n}_2(\omega)}{(\tilde{n}_2(\omega) - 1)^2} \cdot \exp\left(-j \frac{\omega d}{c} (\tilde{n}_2(\omega) - 1)\right) \quad (8)$$

El índice de refracción complejo puede ser descompuesto en dos términos; n es el índice de refracción and k el coeficiente de extinción.

$$\tilde{n} = n - jk \quad (9)$$

La magnitud del cociente entre muestra y referencia puede ser escrita como sigue:

$$\rho(\omega) = \frac{4 \cdot n_2(\omega)}{(n_2(\omega)-1)^2} \cdot \exp\left(-\frac{\omega d}{c} k_2(\omega)\right) \quad (10)$$

Y la fase:

$$\theta(\omega) = \frac{\omega d}{c} (n_2(\omega) - 1) \quad (11)$$

Entonces puede obtenerse el índice de refracción.

$$n_2(\omega) = 1 + \frac{\omega d}{c} \theta(\omega) \quad (12)$$

Y el coeficiente de extinción:

$$k_2(\omega) = -\frac{c}{\omega d} \cdot \ln\left(\frac{(n_2(\omega)-1)^2}{4 \cdot n_2(\omega)} \cdot \rho(\omega)\right) \quad (13)$$

Por último, el coeficiente de absorción se define como sigue:

$$\alpha(\omega) = 2 \frac{k(\omega) \cdot \omega}{c} \quad (14)$$

Para calcular el índice de refracción, n , la información de fase obtenida de las medidas debe ser continua y mayor de 2π . Consecuentemente, la fase medida debe ser linearizada.

El método de linearización puede distorsionar la fase a bajas frecuencias. Para resolver este problema la fase puede ser artificialmente extrapolada.

Es necesario conocer el grosor de la muestra para obtener el valor real de los coeficientes. Con este método de extracción los la ‘forma de onda’ de los coeficientes no depende de del valor del grosor de la muestra, solo cambia la escala.

3.5 Determinación del grosor de las muestras.

La determinación del tamaño de las muestras se basa en las ondulaciones que aparecen al calcular los coeficientes con el método de extracción visto anterior. La frecuencia de oscilación de dichas oscilaciones está relacionada con el grosor óptico de la muestra. El grosor óptico de la muestra se define como el producto del índice de refracción del material por el grosor de la muestra. En las muestras con una fuerte que presenten una fuerte absorción o sean excesivamente gruesas puede que no aparezcan las oscilaciones anteriormente mencionadas, por lo que no sería posible calcular el grosor de dichas muestras.

Para calcular el grosor de la muestra se han considerado diversos algoritmos [3-4]. La aplicación de dichos algoritmos requiere un nuevo cálculo de los coeficientes aplicando el término Fabry-Perot antes ignorado [5].

La ecuación (7) no puede ser resuelta sin conocer el valor del grosor de la muestra por lo que se realiza un barrido de este parámetro. Para cada valor del grosor de la muestra se computan los

coeficientes con el método del capítulo anterior. Utilizando los coeficientes se determina el valor del término Fabry-Perot y posteriormente se vuelven a calcular los coeficientes del material aplicando el término Fabry-Perot obtenido [5]. En este método de extracción la ‘forma de onda’ de los coeficientes depende del grosor de la muestra utilizado en el cálculo.

Al realizar un barrido variando el valor del grosor de las muestras se observa que las oscilaciones se minimizan para un determinado grosor. El valor para el cual las oscilaciones se minimizan es el grosor real de la muestra [4].

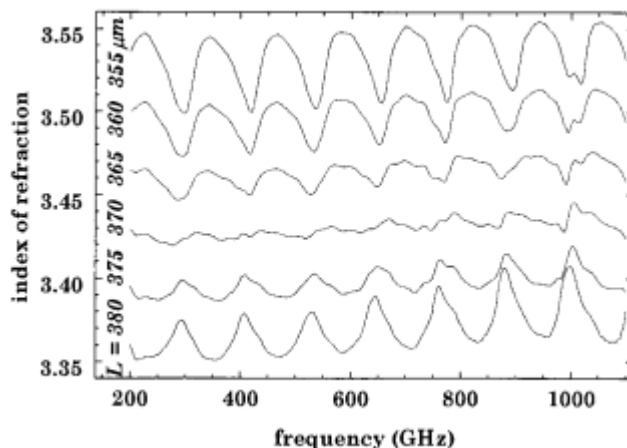


Figura 15. Índice de refracción para diferentes grosores de la muestras

Para obtener el grosor para el cual las oscilaciones se han sido minimizadas se realiza la FFT del índice de refracción. Se mide la amplitud de la frecuencia de la oscilación para cada grosor. El grosor de la muestra es el que se corresponde con la menor de las amplitudes medidas [3].

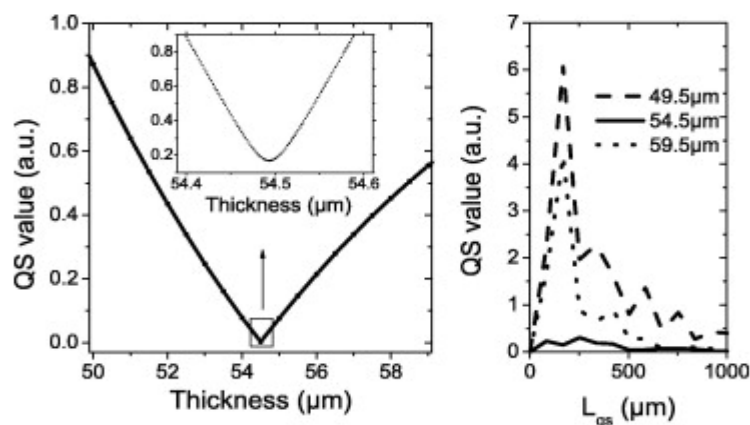


Figura 16. A la izquierda, la amplitud de la frecuencia correspondiente a las ondulaciones para diferentes grosores. A la derecha la transformada de Fourier del coeficiente de reflexión para diferentes grosores

El algoritmo se puede aplicar utilizando tanto el índice de refracción como con el coeficiente de refracción o el coeficiente de extinción aunque se recomienda aplicarlo con el primero ya que presenta menores variaciones de amplitud.

4. Desarrollo Del Trabajo.

4.1 Implementación del sistema

La primera parte del trabajo realizado en este proyecto consiste en la puesta en marcha del espectroscopio Teraherzio.

Para la construcción del sistema, primeramente debemos situar el láser en la mesa. Colocamos delante el beamsplitter con el que dividimos el haz del láser en dos diferentes. Este será el inicio del haz de prueba y del haz de bombeo del sistema.

Se colocan los espejos y lentes para guiar el haz del láser hasta la posición que ocuparán las antenas en la mesa. Los caminos son de igual longitud, aunque la del rayo de bombeo se puede variar con la línea de desplazamiento. Hay que realizar un correcto alineamiento de los espejos y las lentes. Dicho alineamiento se realiza con un laser de menor potencia por seguridad.

Para ubicar las antenas, estas se montan en un soporte y se alinean con los haces láser. La antena emisora se polariza con una fuente de tensión y la antena receptora se conecta a la entrada del Lock-In Amplifier. Una vez alineados todos los elementos que se encuentran en el camino de los haces láser se sustituye el láser de alineamiento por el láser real del sistema.

Por último se sitúa el modulador óptico antes de la antena emisora para modular el haz de bombeo y se conecta con un cable al Lock-In Amplifier. Este cable transmite una señal sinusoidal con la frecuencia del modulador óptico. La señal actúa como señal de referencia para el Lock-In Amplifier.

Los instrumentos controlados por el ordenador son la línea de desplazamiento y el Lock-In Amplifier. La primera se conecta a un controlador mediante un bus RS-232 y éste al ordenador mediante un puerto USB. El Lock-In Amplifier se conecta al ordenador mediante un bus de datos GPIB.

El sistema ya está instalado pero aún no puede ser utilizado, es necesario un software que configure y controle los dos instrumentos antes mencionados y guardes los datos recibidos. Para ello se han realizado dos programas, uno para buscar el pulso en la línea de retardo y otro para la obtención de las medidas propiamente dichas. El primero de estos programas sirve para determinar las posiciones de la línea de desplazamiento que debemos recorrer. Debe ser utilizado antes del programa principal en el que utilizaremos los resultados obtenidos en él.

4.2 Programa principal

El programa principal tiene como objetivos principales; permitir a los usuarios seleccionar los parámetros de la medida, mostrar los datos obtenidos durante el proceso de medida y en el caso de que ocurra un error durante la ejecución del programa mostrar el código del error y la causa de este. El programa está dividido en tres páginas, una para cada función que realiza

Página de configuración

La página de configuración sirve para seleccionar los parámetros del Lock-In Amplifier y de la línea de desplazamiento antes de iniciar el proceso de toma de medidas.

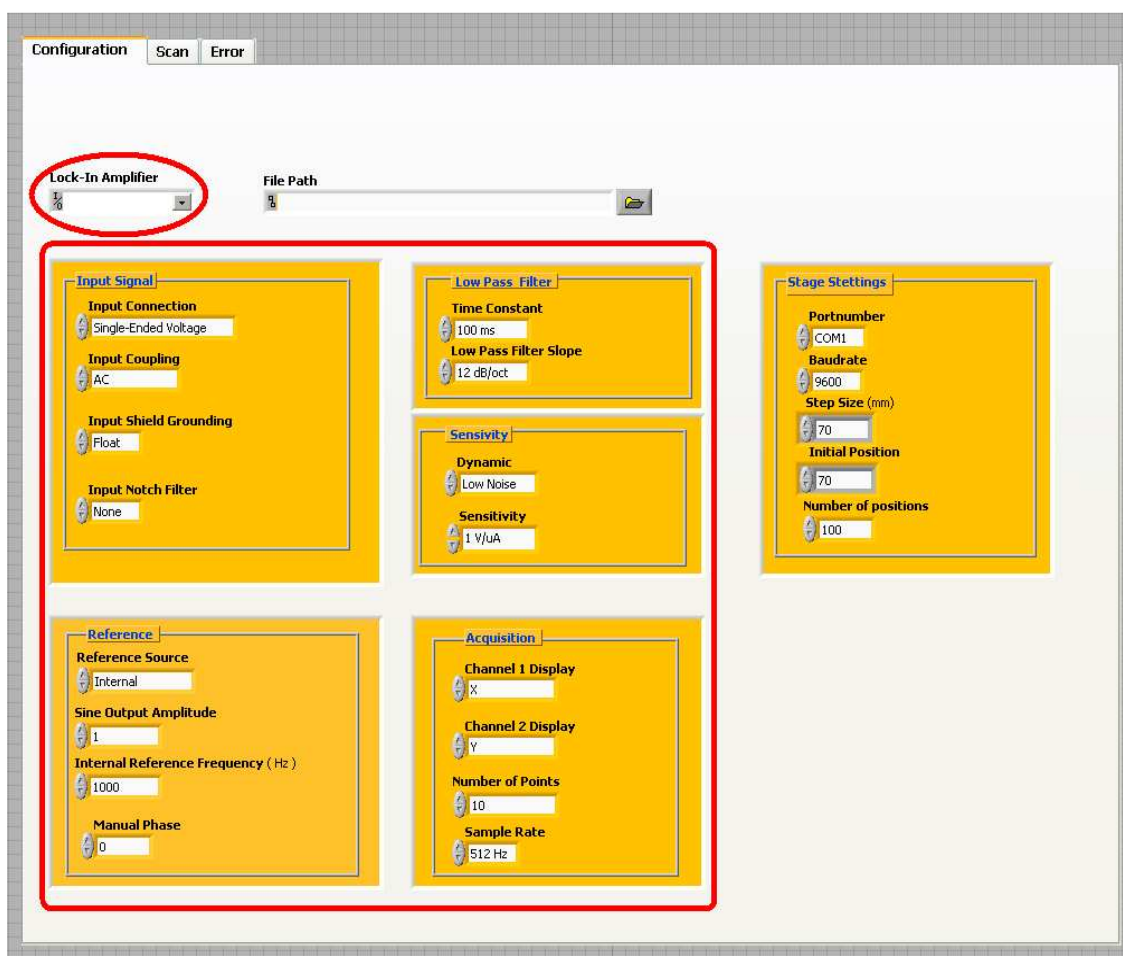


Figura 17. Página de configuración del programa principal. En rojo los controles para establecer la configuración inicial del Lock-In Amplifier

- Lock-In amplifier Control es utilizado para seleccionar el instrumento y dirección de bus GPIB.
- Input Signal Cluster permite establecer los parámetros relacionados con la señal de entrada. Resistencia de entrada, Tierra, Acoplamiento y Filtro de entrada.
- Reference Cluster determina los parámetros de la señal de referencia. Normalmente la señal de referencia será externa, pero en caso de no tener una señal de referencia procedente del modulador óptico se debería seleccionar la referencia manual y seleccionar sus parámetros

- Low Pass Filter Cluster es usado para determinar los parámetros del filtro de salida del Lock-In Amplifier.
- Sensitivity Cluster establece la sensibilidad y reserve dinámica (ganancia) del Lock-In Amplifier
- Acquisition Cluster permite la selección del tipo de data recibido, el numero de muestras medido en cada iteración y la tasa de muestreo del the Lock-In amplifier.

Inicializar la línea de desplazamiento

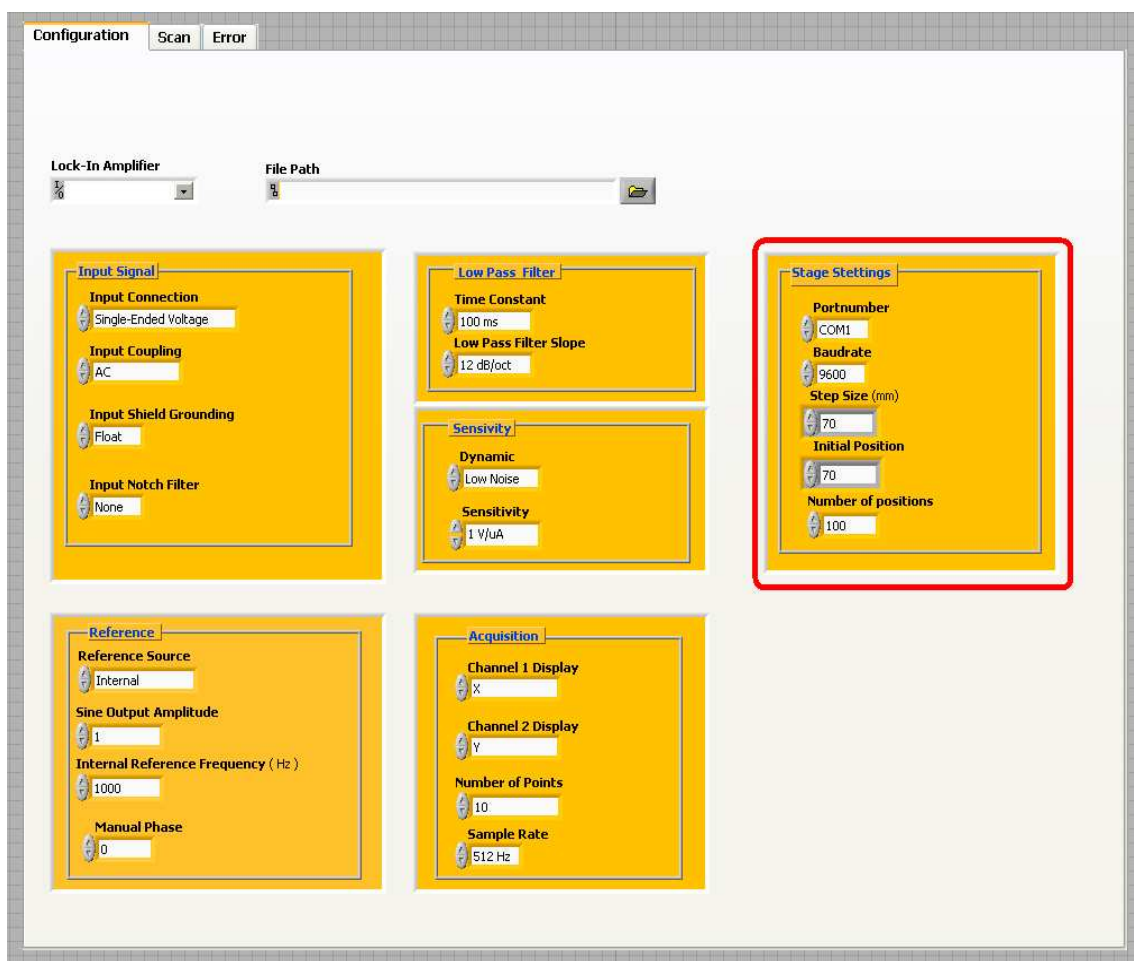


Figura 18. Página de configuración del programa principal. En rojo los controles para establecer la configuración inicial de la línea de desplazamiento.

En la página de configuración encontramos un cluster para inicializar la línea de desplazamiento. Es importante seleccionar el número de puerto correcto al que está conectado el controlador de la línea de desplazamiento, así como la velocidad de la conexión para establecer la comunicación entre el ordenador y la línea de desplazamiento. La velocidad de la conexión debe ser la misma en que la seleccionada manualmente en el controlador de la línea de desplazamiento. Los otros controles del cluster sirven para seleccionar la posición inicial, el tamaño de los desplazamientos y el número de muestras que vamos a tomar del pulso Terahertzio. El tamaño de los desplazamientos está directamente relacionado con la frecuencia de muestreo del espectroscopio.

La página de medidas se utiliza durante el proceso de toma de medidas. Su función principal es representar los datos de adquiridos en tiempo real y el control de la ejecución del programa.

Página de medidas



Figura 19. Página de medidas del programa principal.

- Cada gráfico muestra un canal del lock-in amplifier.
- El tanque representa el valor de la actual muestra en un intervalo entre los valores máximo y mínimo medidos.
- Reset resetea los valores de máximo y mínimo.
- Time Step muestra el periodo de muestreo
- Position es la posición actual de la línea de desplazamiento
- Autophase envía la orden de actualizar la fase de la frecuencia generada por el Lock-In amplifier, sincronizándola con la fase de la frecuencia de referencia.

Página de errores

La página de errores sirve para mostrar al usuario si se ha producido un error durante la ejecución. Si existe un error durante la ejecución del programa muestra el código de error y su origen.

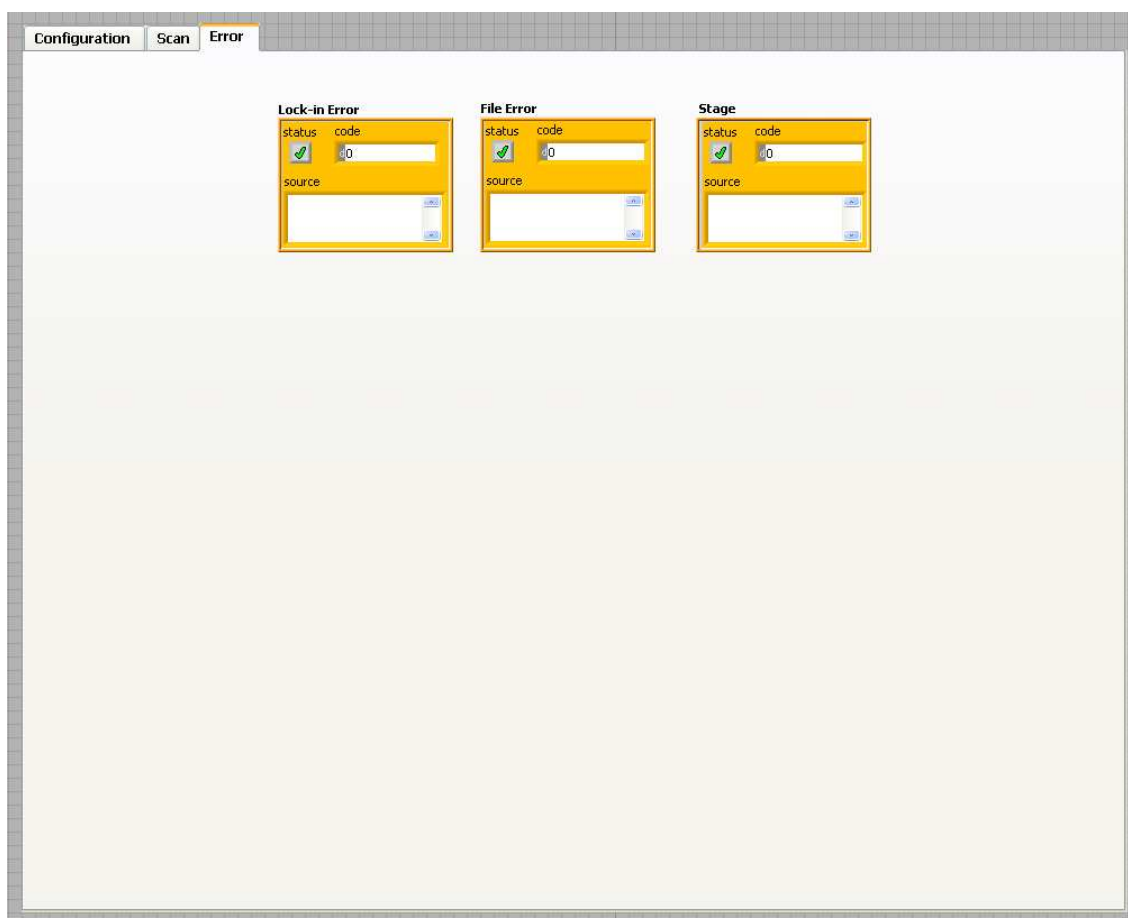


Figura 20. Página de errores del programa principal.

La página muestra los errores producidos durante el proceso de medida en el caso de que ocurran. También muestra el código del error que a causado la detención del programa. Los errores pueden estar originados por la línea de desplazamientos, el Lock-In Amplifier o el archivo dónde se guardan las medidas.

Datos obtenidos

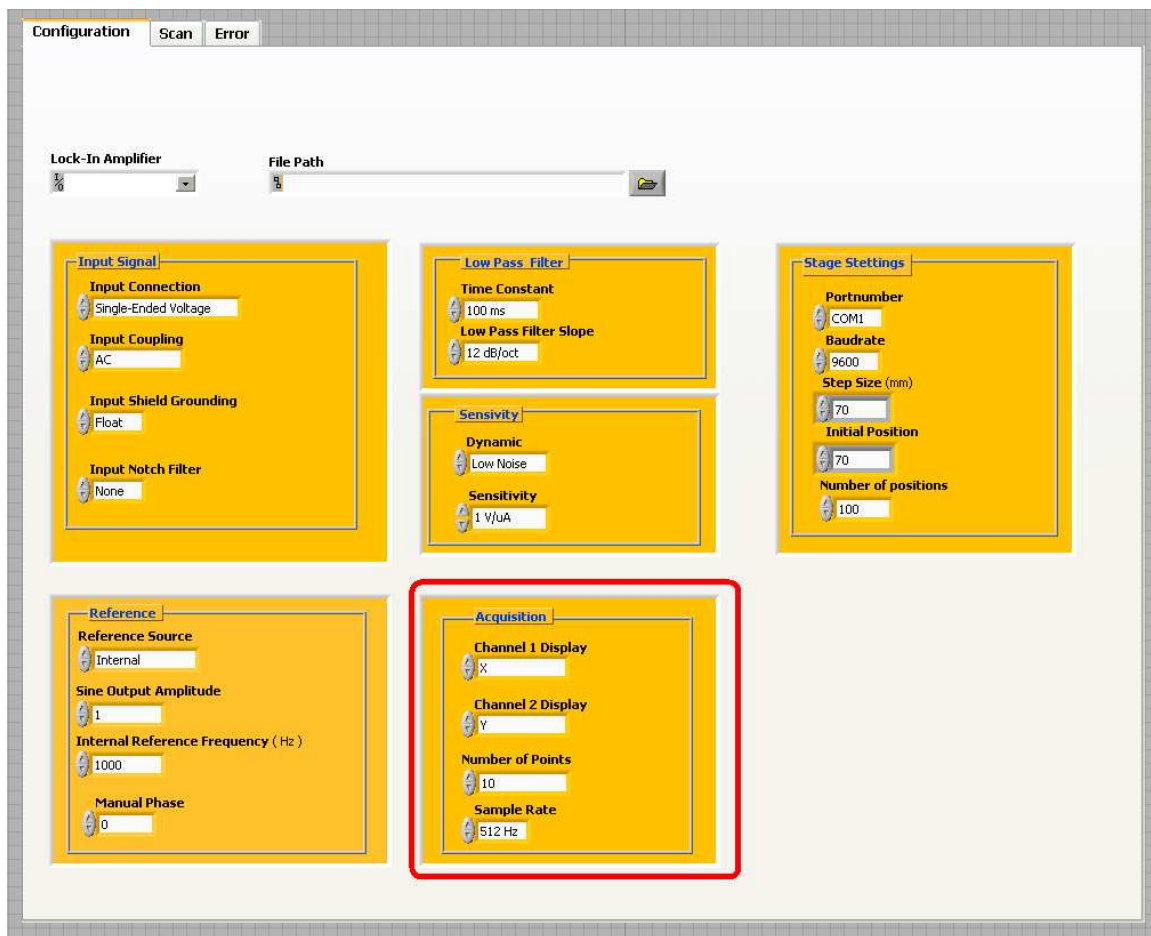


Figura 21. Página de configuración del programa principal. En rojo los controles para determinar el tipo de datos que adquiere el Lock-In Amplifier.

Los datos obtenidos son seleccionados con el Cluster de adquisición. Es posible obtener las componentes en fase y cuadratura de la señal o la amplitud y la fase de la misma. En el canal 1 podemos seleccionar la componente en fase (X) o la amplitud (R) y en el canal 2 la componente en cuadratura (Y) o la fase. El número de puntos es el número de muestras que toma el programa en cada posición de la línea de desplazamiento, después se calcula la media de todos ellos. La velocidad de muestreo es la velocidad a la que es muestreada la señal en banda base. Después los datos son guardados en un archivo

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	3/29/2011	4:52 PM	Step Size: 0.001000									
2												
3	Values of X	Values of Y	Position									
4	-3.87E-08	5.23E-06	20									
5	4.55E-07	8.68E-08	20.000937									
6	4.16E-07	-1.26E-07	20.001875									
7	3.28E-07	-2.97E-07	20.002813									
8	2.02E-07	-4.25E-07	20.00375									
9	5.14E-08	-5.00E-07	20.004687									
10	-1.06E-07	-5.16E-07	20.005625									
11	-2.57E-07	-4.69E-07	20.006563									
12	-3.74E-07	-3.67E-07	20.0075									
13	-4.46E-07	-2.18E-07	20.008437									
14	-4.62E-07	-4.30E-08	20.009375									
15	-4.23E-07	1.42E-07	20.010313									
16	-3.29E-07	3.12E-07	20.01125									
17	-1.87E-07	4.57E-07	20.012188									
18	-8.48E-09	5.61E-07	20.013125									
19	1.88E-07	6.04E-07	20.014063									
20	3.86E-07	5.82E-07	20.015									
21	5.69E-07	4.98E-07	20.015938									
22	7.26E-07	3.66E-07	20.016875									
23	8.43E-07	1.98E-07	20.017813									
24	9.06E-07	5.77E-09	20.01875									
25	9.06E-07	-1.96E-07	20.019688									
26	8.43E-07	-3.99E-07	20.020625									
27	7.17E-07	-5.86E-07	20.021563									
28	5.24E-07	-7.39E-07	20.0225									
29	3.09E-07	-8.29E-07	20.023438									
30	9.06E-08	-8.57E-07	20.024375									
31	-1.10E-07	-8.26E-07	20.025312									
32	-2.64E-07	-7.37E-07	20.02625									

Figura 22. Muestra de un archivo creado por el espectroscopio.

En la cabecera del archivo están guardados la fecha y hora de la medida y el tamaño de los desplazamientos en mm.

La primera columna muestra los datos medidos en el canal 1 del Lock-In Amplifier, en este caso se trata de la componente en fase de la señal. La segunda columna contiene los datos procedentes del canal 2, en esta ocasión la componente en fase de la señal y la tercera la posición de la línea de desplazamiento en la que han sido medidos estos datos.

4.3 Programa busca-pulsos

Este programa es ejecutado antes del programa principal para encontrar las posiciones de la línea de desplazamiento donde se encuentra el pulso Teraherzio.

Entonces, el usuario puede seleccionar la posición inicial y el número de posiciones que se deben recorrer en el programa principal.

La estructura de programa es muy similar a la del programa principal, pero no es necesario guardar los datos en un archivo. Las páginas de configuración y de errores son idénticas a las del programa principal, ya que son imprescindibles para el funcionamiento de los instrumentos que componen el espectroscopio.

La página de medidas es ligeramente diferente a la del programa principal. En este caso se han añadido varios botones para controlar la línea de desplazamiento durante la ejecución del programa. La gráfica muestra la amplitud de la señal en cada posición de la línea de desplazamiento. El intervalo mostrado se puede determinar mediante los controles Move To y Move until. Cada vez que son modificados los valores de estos controles se inicia una nueva toma de medidas.

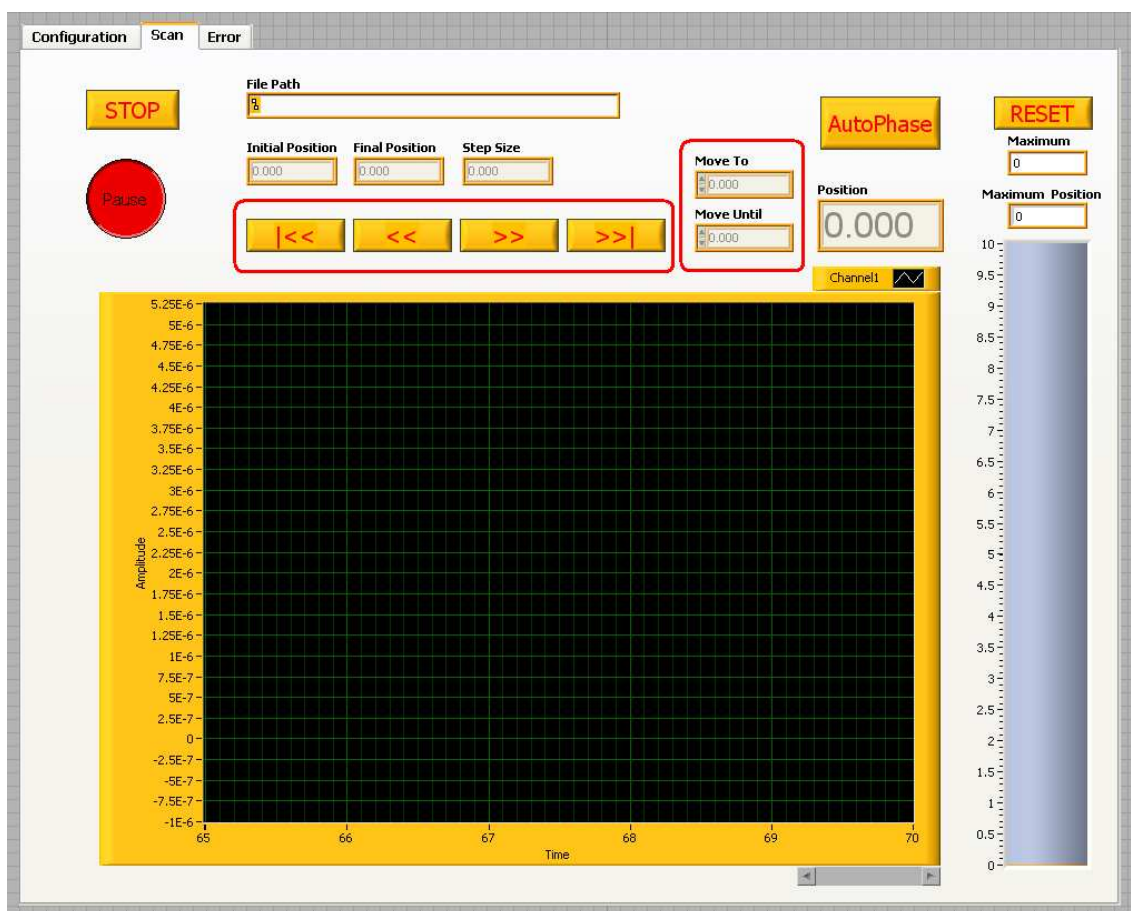


Figura 23. Página de configuración del programa Busca-Pulsos. En rojo los controles para que controlan el movimiento de la línea de desplazamiento y determinan el área de exploración.

. Estos son los controles que permiten el manejo de la línea de desplazamiento:



Mueve la línea de desplazamiento continuamente hacia la izquierda



Mueve la línea de desplazamiento una posición hacia la izquierda

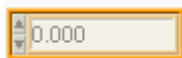


Mueve la línea de desplazamiento una posición hacia la derecha



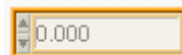
Mueve la línea de desplazamiento continuamente hacia la derecha

Move To



Posición inicial del movimiento

Move Until



Posición final del movimiento

Se puede escanear la línea de desplazamiento tantas veces como se quiera hasta pulsar el botón stop. Es posible que incluso se encuentre dos pulsos en la línea de desplazamiento aunque uno puede que no esté completo, por lo que no basta con buscar el valor máximo de señal.

Una vez encontrado el pulso completo el usuario debe retener el valor inicial y final de este para introducir estos valores en el programa principal del espectroscopio.

4.4 Cálculo de coeficientes y del grosor de la muestra

El siguiente paso para obtener los datos deseados es el cálculo de los coeficientes. Para ello se ha creado un programa que calcula el índice de refracción y el coeficiente de absorción a partir de los pulsos medidos con el espectroscopio. Para calcular estos coeficientes se ha utilizado el método de extracción visto en el capítulo 3.4 Análisis de Datos.

El programa principal del espectroscopio guarda los pulsos Terahertzio. La información frecuencial de estos pulsos ha sido obtenida mediante los cálculos de la FFT. Para calcular los coeficientes necesitamos el pulso de referencia y el de muestra.

Para la obtención de los coeficientes es necesaria una determinación precisa del grosor de la muestra. Dos métodos para calcular el grosor de la muestra han sido utilizados en este trabajo. El primero a partir de la posición del primer eco y el segundo minimizando el efecto Fabry-Perot.

El primero de estos métodos está basado en el cálculo de la posición temporal del primer eco. Para calcular esta posición, se utiliza un algoritmo basado en las ondulaciones que aparecen en los coeficientes. Primero, se calcula el índice de refracción utilizando un grosor de 1m. Después, se calcula la FFT del anterior índice de refracción para encontrar la componente frecuencial más importante. Esta frecuencia es la posición temporal del primer eco.

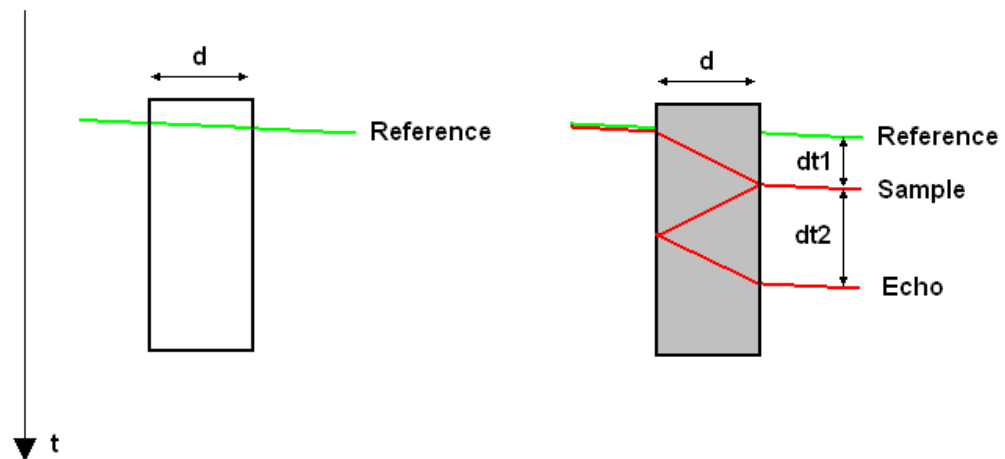


Figura 24. Esquema de las reflexiones interna tanto del pulso referencia como del pulso muestra.

Finalmente, el grosor de la muestra se calcula con la siguiente fórmula:

$$d = c\left(\frac{dt_2}{2} - dt_1\right) \quad (15)$$

Dónde dt_1 es el retardo del pulso de muestra con respecto al de referencia y dt_2 es el retardo del eco con respecto al pulso de muestra

El segundo método para calcular el grosor de las muestras es el expuesto en el capítulo 3.5 Determinación del grosor de las muestras.

Este método es mejor para el cálculo de muestras muy delgadas, ya que para muestras gruesas el valor del índice de refracción tiende a uno. Esto impide el uso de este algoritmo para muestras excesivamente gruesas.



Figura 25. Índice de refracción. En rojo las oscilaciones producidas por las reflexiones internas en la muestra.

El programa muestra los coeficientes y el grosor de la muestra calculado para los pulsos referencia y muestra introducidos. Estos pulsos han sido obtenidos con el programa Principal del espectroscopio. Las ondulaciones en el coeficiente aparecen generalmente entre 0,2 y 1,2 THz por lo que utilizamos esta zona del coeficiente para calcular la frecuencia de dichas ondulaciones.

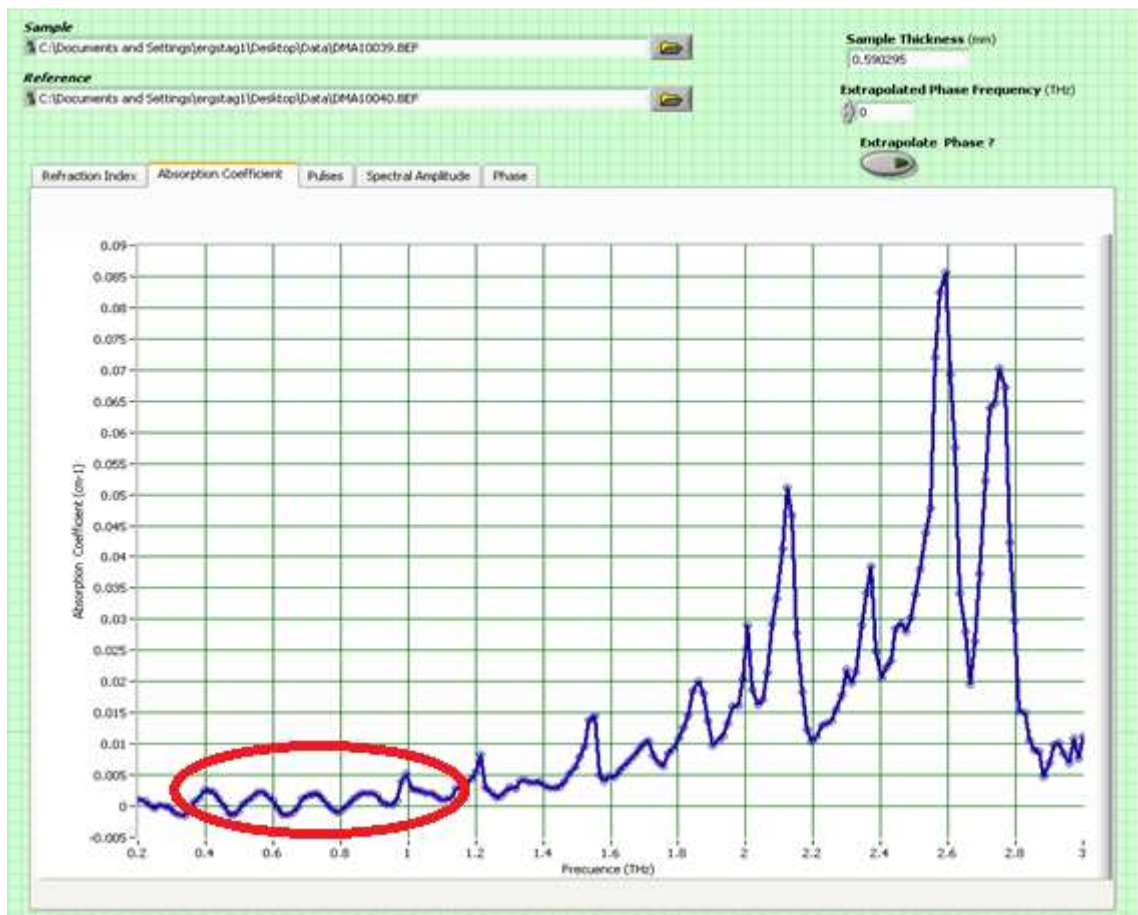


Figura 26. Coeficiente de absorción. En rojo las oscilaciones producidas por las reflexiones internas en la muestra.

Como se puede apreciar en la imagen, en el coeficiente de absorción también aparecen ondulaciones aproximadamente en el rango 0,2-1,2 THz.

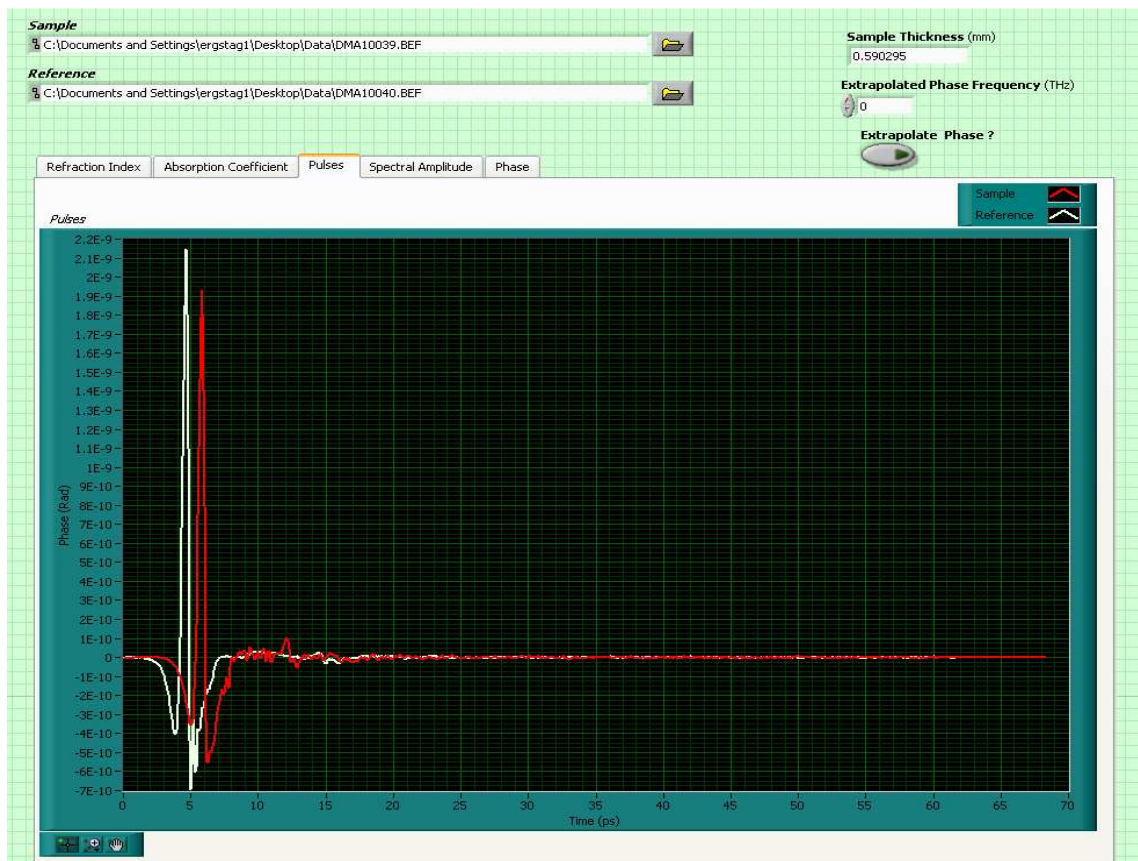


Figura 27. Representación de los pulsos muestra y referencia medidos con el espectroscopio. El pulso blanco es el pulso referencia y el pulso rojo el pulso muestra.

En los pulsos medidos con el espectroscopio es posible habitualmente observar el eco producido por las reflexiones internas. También se puede observar el retardo del pulso muestra con respecto del pulso referencia.

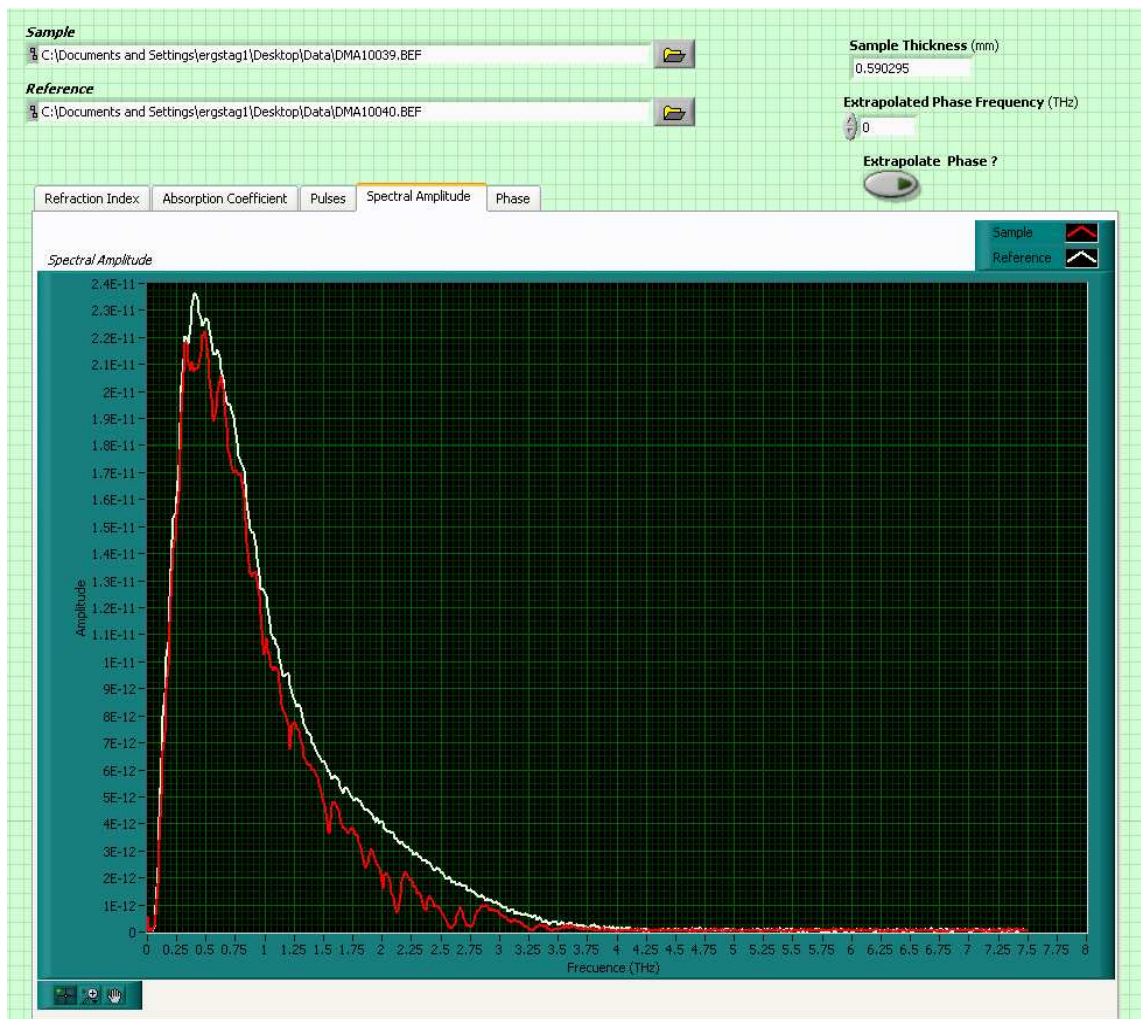


Figura 28. Espectro de los pulsos. El pulso blanco es el espectro del pulso referencia y el pulso rojo es el espectro del pulso muestra.

Con el espectro del pulso podemos hacernos una idea del ancho de banda del espectroscopio. Por otra parte observamos que las ondulaciones en los coeficientes aparecen en las frecuencias con mayor energía del pulso.

4.5 Procesado de señal

Antes de realizar el cálculo de los coeficientes es necesario acondicionar diferencia de fase de los pulsos muestra y referencia. Al aplicar el algoritmo que permite tener una fase continua es posible que para las bajas frecuencias la fase le haya distorsionado. Es posible extrapolar la fase si se ha distorsionado. Para realizar la extrapolación existen dos controles, uno determina si la fase va a ser extrapolada o no, y el otro selecciona el intervalo de frecuencias que va a ser extrapolado

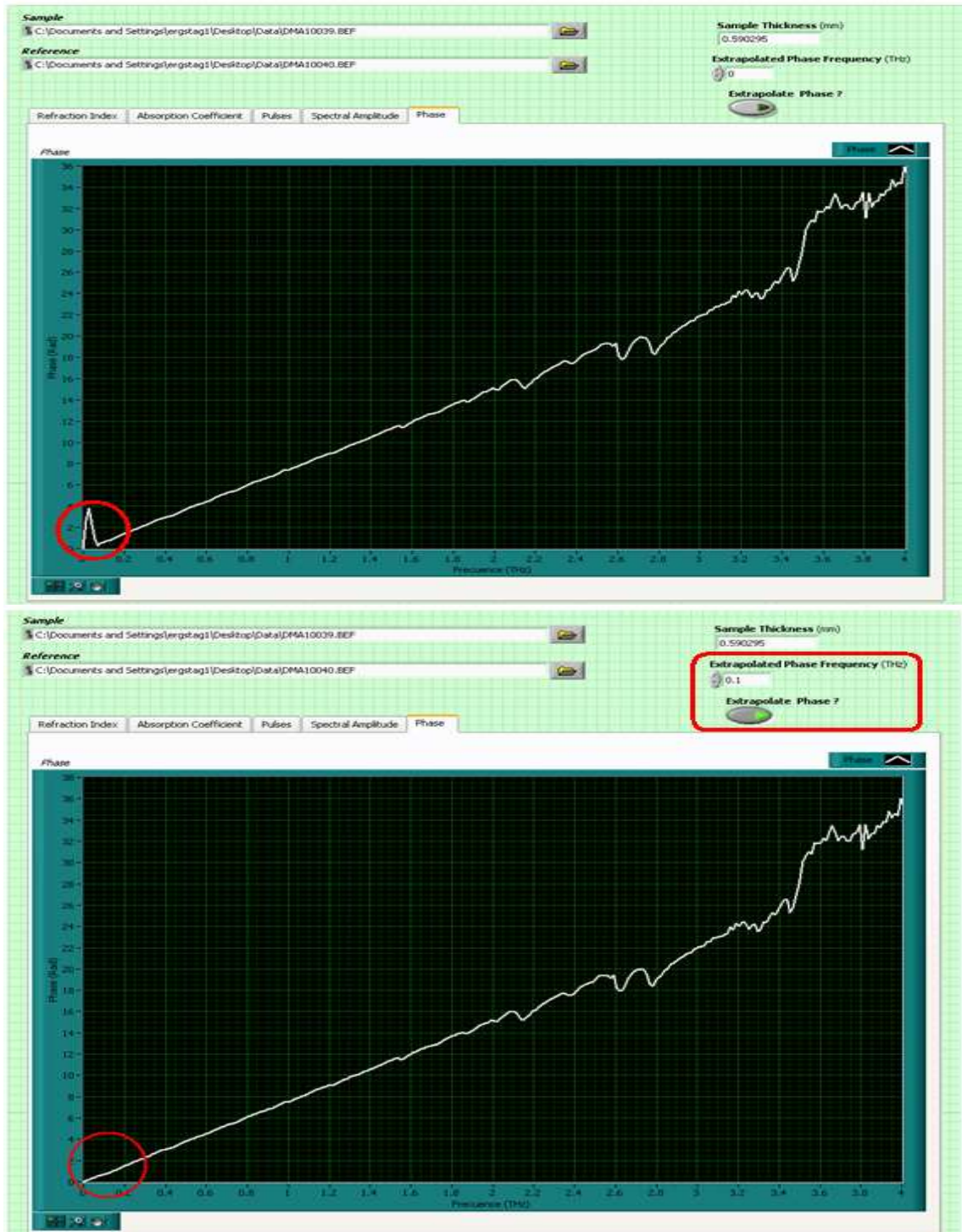


Figura 29. La figura representa el error de la fase debido al algoritmo para linearizar la fase y su corrección mediante extrapolación.

Después de la obtención de los coeficientes y con el objetivo de eliminar las oscilaciones en los coeficientes causadas por las reflexiones internas tenemos dos opciones, podemos considerar el término Fabry-Perot en las ecuaciones o eliminar el eco en la señal temporal.

$$FP(\omega) = \frac{1}{1 - R_{21} \cdot R_{23} \cdot \exp(-j \frac{\tilde{n}_2 \omega d}{c})} \quad (16)$$

En el primer caso podemos calcular el grosor de la muestra calculando los coeficientes para diferentes grosores. El grosor correcto será aquel que elimine las oscilaciones completamente. Por tanto, al mismo tiempo que calculamos el grosor de la muestra eliminamos las oscilaciones.

Para calcular este algoritmo calculamos la FFT del índice de refracción para grosores 1 μm y 1mm. Después medimos la amplitud de la frecuencia de las oscilaciones. El grosor correcto es el que genera la menor amplitud para esa frecuencia concreta.

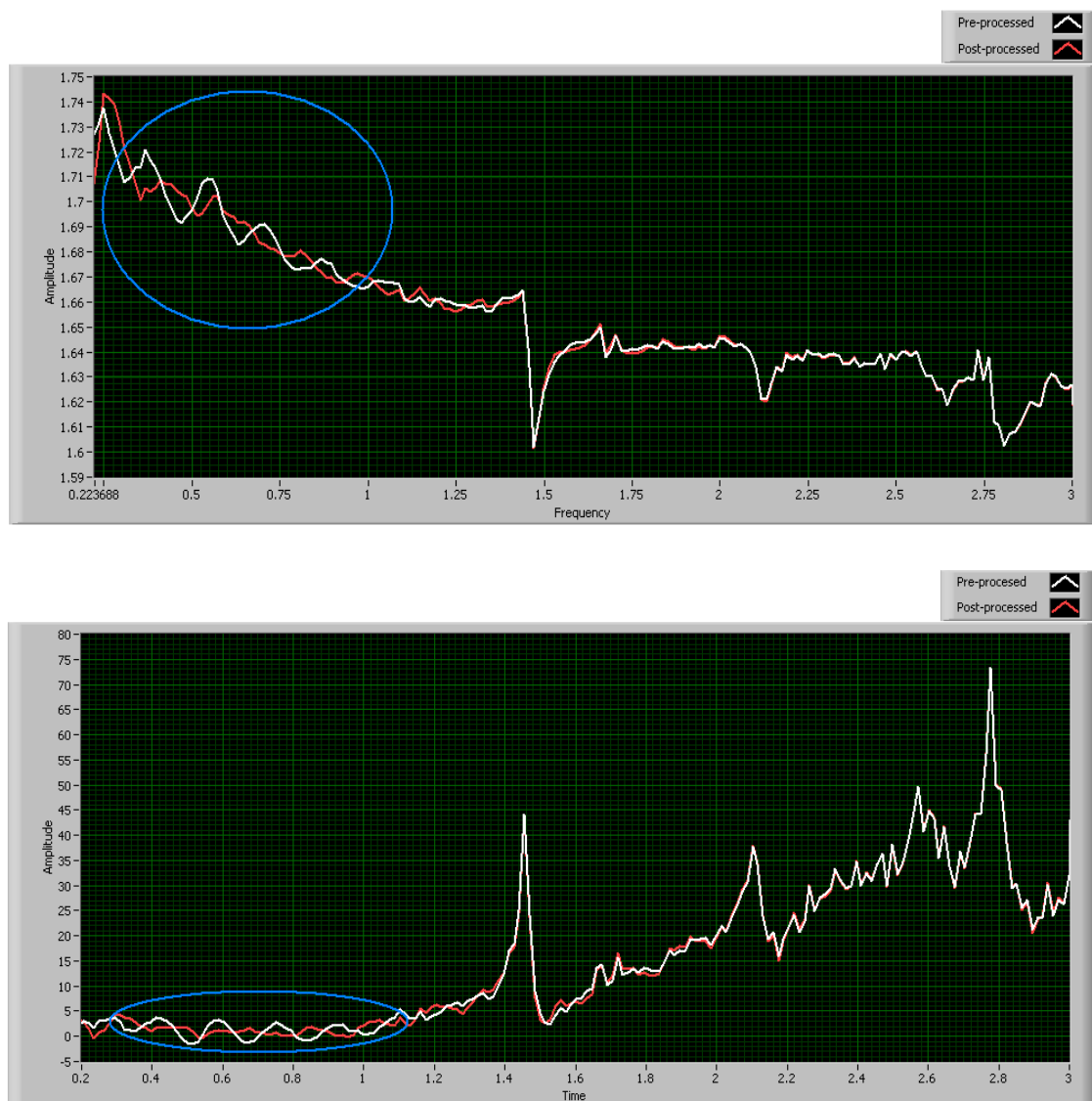


Figura 30. La gráfica superior muestra el índice de absorción de la glucosa antes (blanco) y después (rojo) de eliminar las ondulaciones con el método del término Fabry-Perot. La gráfica inferior muestra el coeficiente de absorción de dicha sustancia aplicando el mismo procesado de señal.

La segunda opción es eliminar el eco de la señal temporal. Primero, calculamos el cociente referencia-eco con los coeficientes que hemos calculado. Para obtener la señal temporal del primer eco se ha calculado la FFT inversa. Finalmente el eco es sustraída a la señal muestra. Es necesaria una precisa determinación del grosor de la muestra para calcular la señal eco y colocarla en la posición correcta para restarla a la señal muestra.

$$\frac{E_{echo}(\omega)}{E_{reference}(\omega)} = \frac{T_{12}(\omega) \cdot P_2(\omega, d) \cdot R_{21}(\omega) \cdot P_2(\omega, d) \cdot R_{21}(\omega) \cdot P_2(\omega, d) \cdot T_{21}(\omega)}{P_{air}(\omega, d)} \quad (17)$$



Figura 31. La imagen representa el pulso muestra (rojo), la señal eco (rojo) y la señal sin eco (verde).

La señal eco es nula hasta que la primera reflexión es medida. La seña sin eco es prácticamente la misma que la señal con eco excepto en la zona donde se encuentra el primer eco. Los siguientes ecos no tienen la amplitud necesaria para modificar la señal en exceso

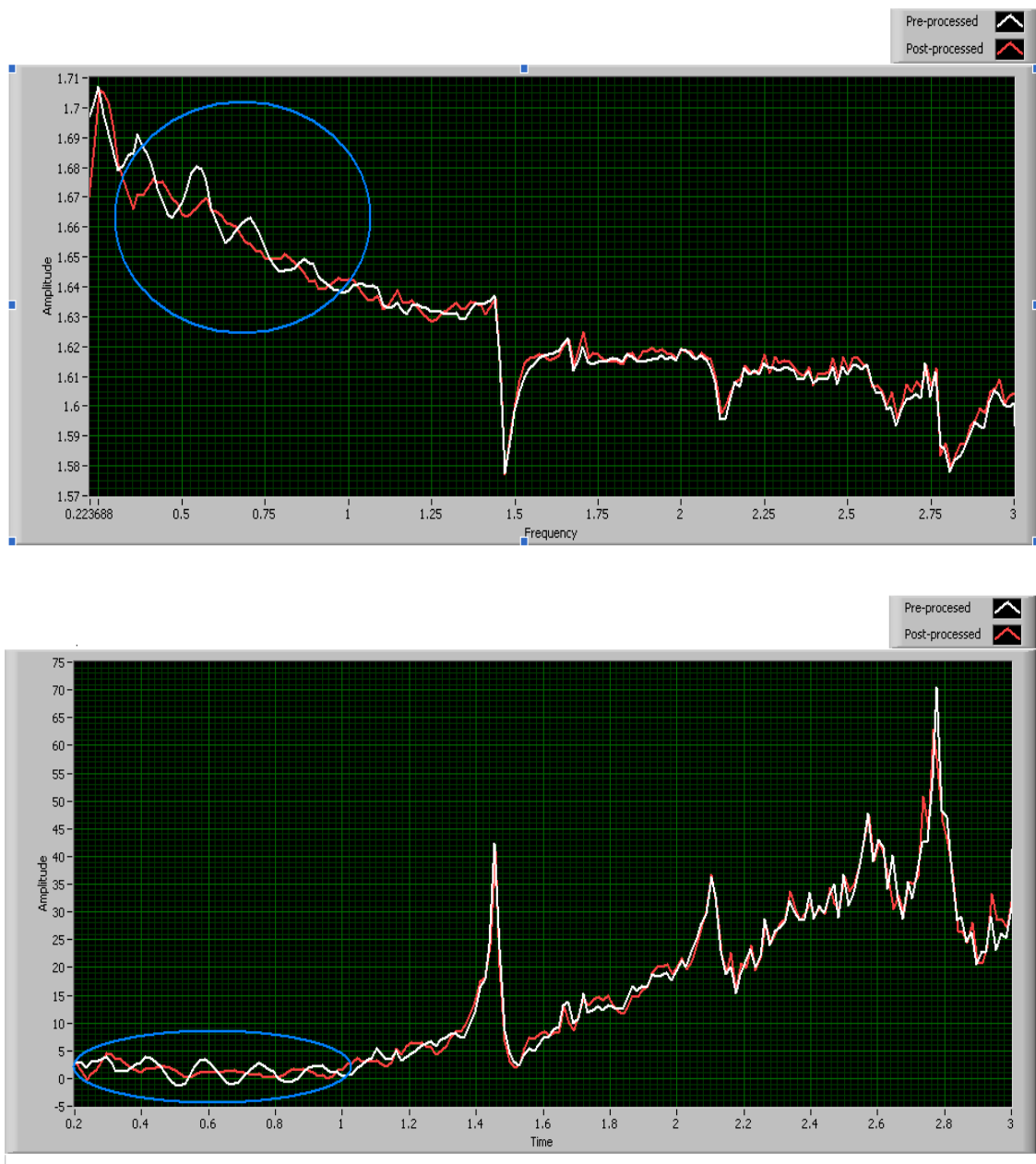


Figura 32. La gráfica superior muestra el índice de absorción de la glucosa antes (blanco) y después (rojo) de eliminar las ondulaciones con el método de cancelación de eco. La gráfica inferior muestra el coeficiente de absorción de dicha substancia aplicando el mismo procesado de señal.

Las imágenes muestran el índice de refracción y el coeficiente de absorción calculado para la señal muestra y la señal sin eco. Como se puede apreciar, las oscilaciones han sido eliminadas.

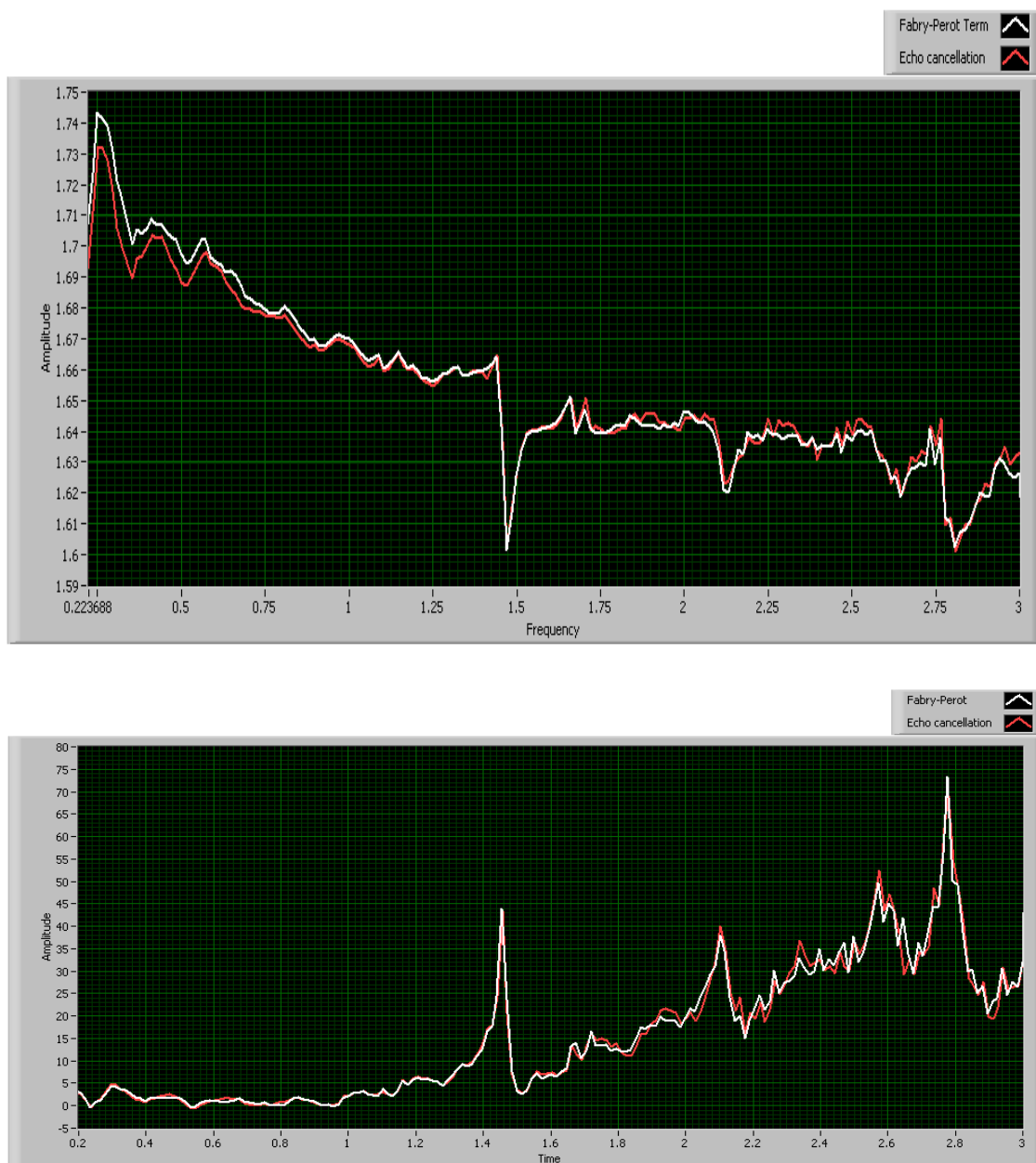


Figura 33. La gráfica superior muestra el índice de absorción de la glucosa una vez eliminadas las oscilaciones con el método Fabry-Perot (blanco) y cancelación de eco (rojo). La gráfica inferior muestra el coeficiente de absorción de dicha sustancia aplicando el mismo procesado de señal.

Las gráficas muestran las diferencias entre los dos métodos usados para eliminar el eco. A altas frecuencias la cancelación de eco es más ruidosa pero ese problema puede resolverse fácilmente mediante un filtrado paso bajo.

El índice de refracción muestra pequeñas diferencias a bajas frecuencias. Esto puede ser debido a error en el cálculo del término Fabry-Perot, ya que es que se trata de un cálculo recursivo en el que siempre hay un pequeño error.

La cancelación utilizando el término Fabry-Perot se usa cuando las muestras son delgadas y la cancelación de eco no puede ser realizada.

4.6 Programa ‘Coeficientes’

El programa ‘Coeficientes’ calcula el índice de refracción y el coeficiente de absorción de la muestra, así como el grosor de esta. En este cálculo el usuario debe elegir entre las múltiples opciones de las que dispone

Es posible seleccionar cualquiera de los dos métodos vistos anteriormente para determinar el grosor de la muestra utilizando para ello cualquiera de los parámetros a la hora de calcular la frecuencia de las oscilaciones. También se puede introducir el grosor de la muestra manualmente

El programa da la posibilidad de extrapolar la fase o no según sea necesario, así como el valor máximo de la frecuencia que se extrapola.

Además realiza el post-procesado de señal mediante la cancelación del eco o mediante la introducción del término Fabry-Perot en los cálculos. Después es posible aplicar uno de los diferentes tipos de filtrado a los coeficientes para lograr una mejor representación.

El programa continúa ejecutándose hasta que el usuario pulsa el botón Stop cuando ha decidido cuál de las representaciones de los parámetros es la mejor. Una vez pulsado Stop el programa permite guardar los coeficientes en un archivo si el usuario así lo desea.

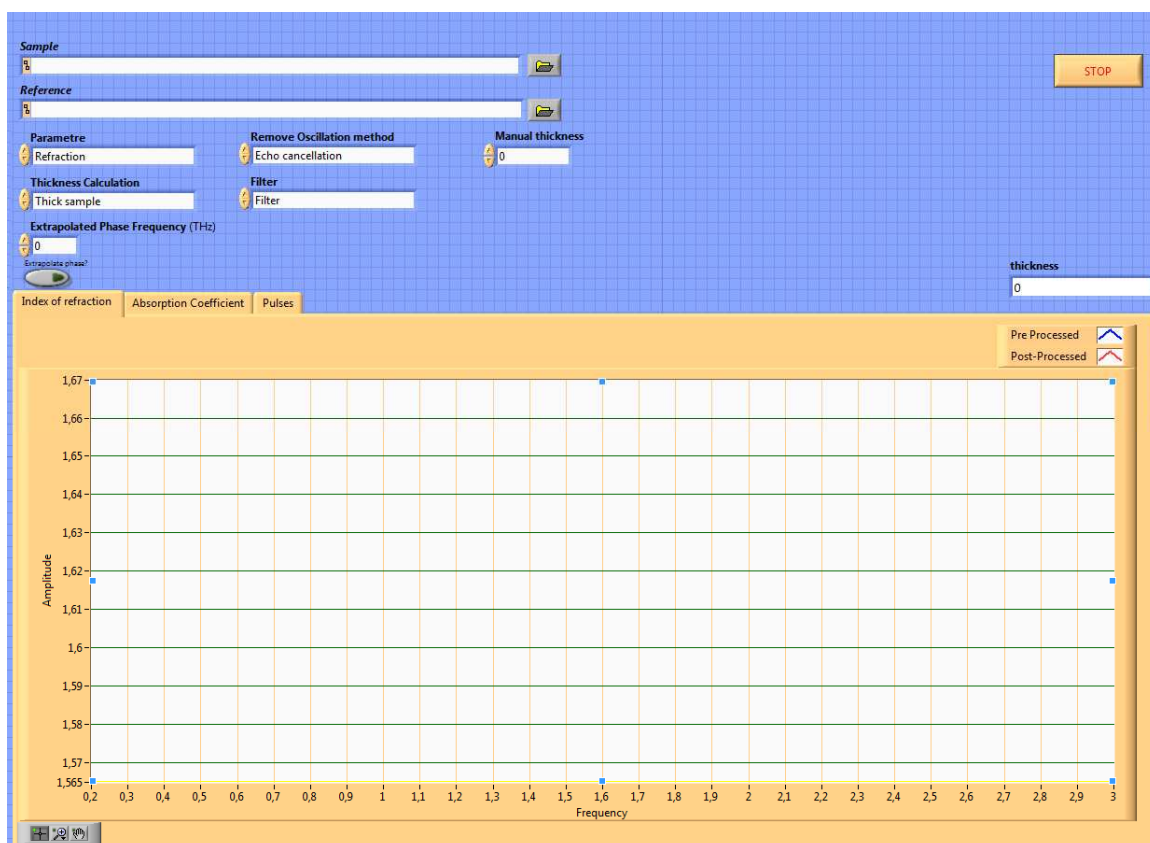


Figura 34. Pantalla del programa ‘Coeficientes’

4.7 Calibración del sistema

Para realizar la calibración del sistema se han realizado medidas de sustancias conociendo su grosor. Después se han comparado los resultados con el grosor medido por el sistema y en algunos casos con su coeficiente de reflexión. En este capítulo podemos comparar el índice de refracción y el coeficiente de absorción del diamante obtenido experimentalmente y el obtenido por Kubarev [6].

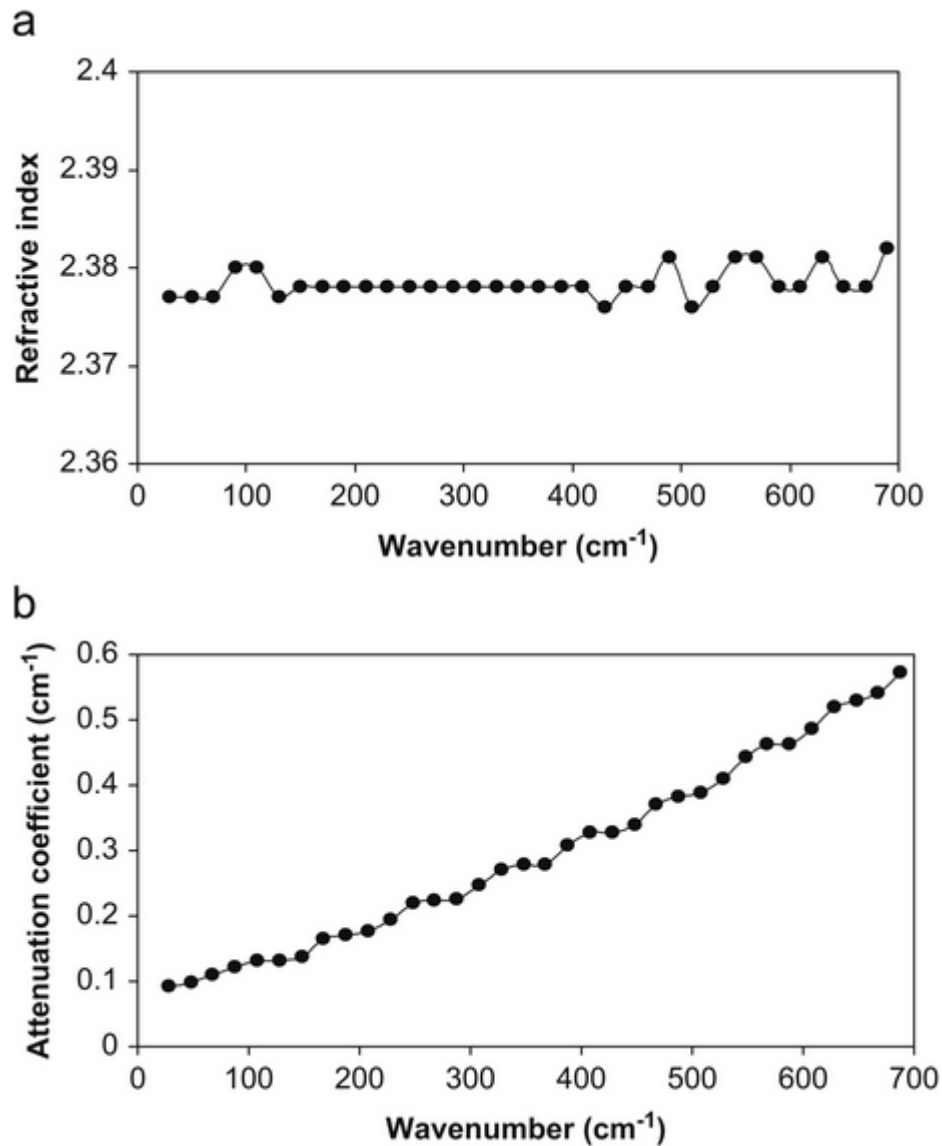


Figura 35. La gráfica representa el índice de refracción y el coeficiente de absorción del diamante medido por Kubarev.

La muestra de diamante fue medida antes del experimento presentando un grosor de $920\text{ }\mu\text{m}$ y con una precisión de $10\text{ }\mu\text{m}$. El grosor calculado por el programa 'Coeficientes' es de $922\text{ }\mu\text{m}$ por lo que tenemos un valor



Figura 36. La gráfica representa el índice de refracción y el coeficiente de absorción del diamante medido en el laboratorio.

Para obtener los coeficientes se ha cancelado el eco y después se ha aplicado un filtrado paso bajo para suavizar las curvas. Podemos comprobar que el índice de refracción es muy parecido en ambos casos, siendo prácticamente constante con un valor de 2,38 aproximadamente. El coeficiente de absorción medido difiere del obtenido por Kubarev [6]. Este error no es importante ya que en el caso del diamante el coeficiente de absorción es excesivamente bajo por lo que estas diferencias pueden ser producidas por el ruido. En todo caso el coeficiente calculado es siempre menor que $0,9\text{ cm}^{-1}$ por lo que el error es muy pequeño.

4.8 Efectos de la temperatura

La temperatura a la que se realiza la medida es importante, ya que el espectro de absorción de las sustancias varía con ella.

A muy bajas temperaturas las moléculas tienen menos energía y se mueven menos. Esta es la causa de la diferencia del coeficiente de absorción. A bajas temperaturas los picos de absorción se ven más claramente, aunque pueden ser desplazados e incluso aparecer picos nuevos.

Las medidas de sustancias a diferentes temperaturas han sido tomadas en el espectroscopio de la Universidad de Freiburg (Alemania) que dispone de una cámara para enfriar las muestras hasta 4°K.

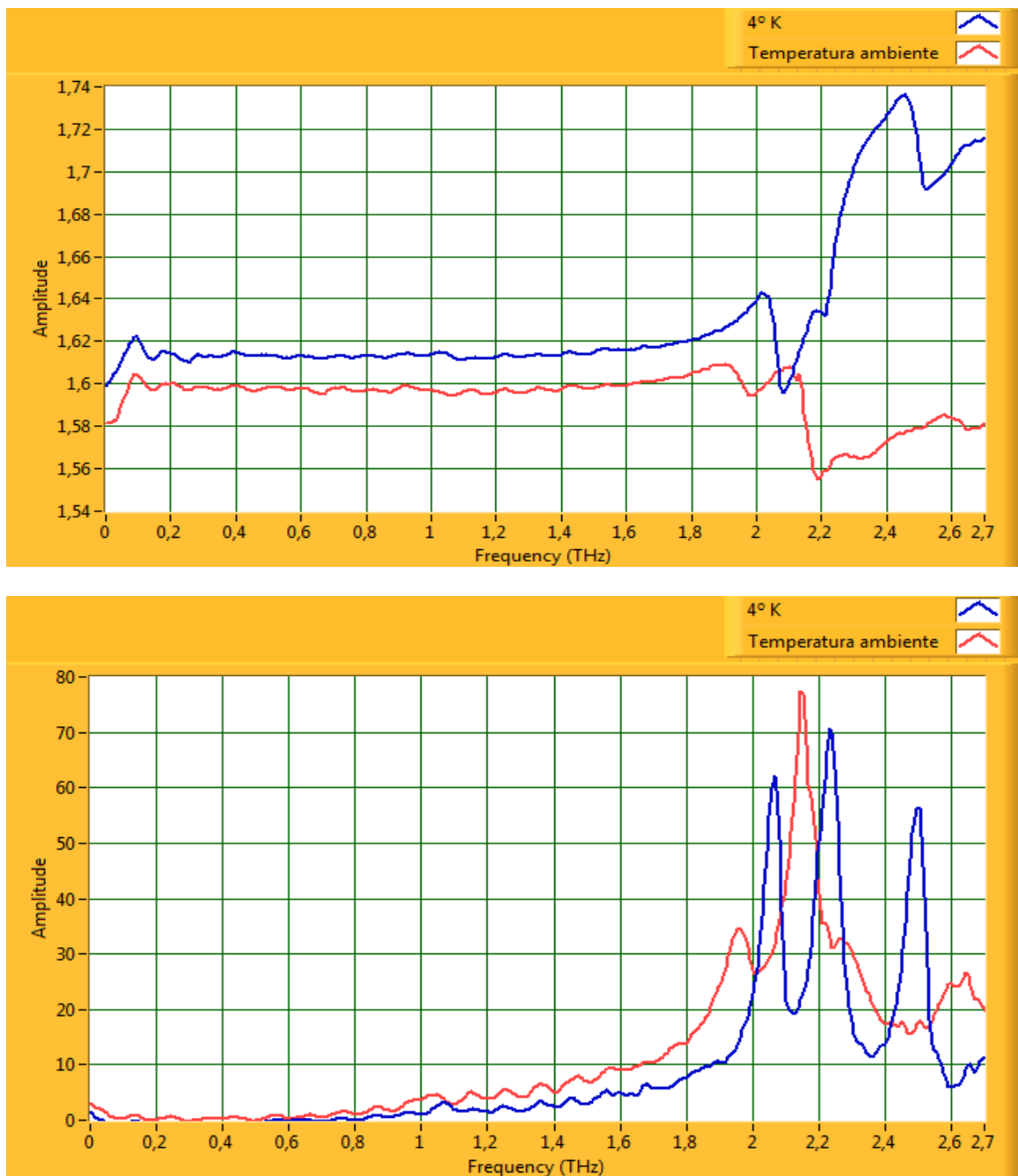


Figura 36. La gráfica representa el índice de refracción y el coeficiente de absorción de la galactosa medido a temperatura ambiente y a 4°K.

5. Estudio económico.

En este capítulo se presenta un presupuesto aproximado del coste de los diferentes componentes del espectroscopio.

Artículo	Cantidad	Precio	Total
Lock-In Amplifier	1	4268 €	4268 €
Reflectores Parabólicos	4	648 €	2592 €
Modulador óptico	1	2147 €	2147 €
Línea de desplazamiento	1	3337 €	3337 €
Espejos, lentes, soportes	1	8000 €	8000 €
Láser	1	50000 €	50000 €
Mesa óptica	1	10000 €	10000 €
Antenas	2	0 €	0 €
			80344 €

En el precio de todos los componentes están incluidos tanto los sistemas de alimentación como los controladores cuando son necesarios.

El precio del láser y de la mesa óptica es aproximado, ya que fueron adquiridos para otros experimentos anteriormente.

Con el conjunto de espejos, lentes y soportes ocurre la misma situación que con el láser y la mesa óptica por lo que se ha valorado el precio aproximadamente.

Las antenas han sido fabricadas en la Universidad de Freiburg (Alemania). El precio se debe a un acuerdo de colaboración entre dicha universidad y el Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint Louis.

6. Conclusiones.

Labview

El software Labview es uno de los más importantes que permite el control de instrumentos y adquisición de señal. Debido a su popularidad, los fabricantes de instrumentos desarrollan sus propios drivers para Labview para facilitar el uso de sus instrumentos. Normalmente los drivers son por el fabricante de los instrumentos aunque también es posible encontrarlos en la página web de National Instruments.

Debemos modificar y combinar dichos driver para conseguir que el programa realice la función que queremos. También es posible crear drivers a partir de comandos de bajo nivel de programación.

Otra ventaja de Labview con respecto a otros softwares para el control de instrumentos es la posibilidad de realizar el procesado de señal con el mismo programa. Por tanto el procesado de señal puede ser realizado más fácilmente y rápidamente con el mismo programa

Precisión de la línea de desplazamiento

La precisión de la línea de desplazamiento es de $0.1\text{ }\mu\text{m}$. La diferencia entre posiciones normalmente es de $10\text{ }\mu\text{m}$, así que el error es en torno al 1%. El error puede ser más alto en caso de aumentar la velocidad de la línea de desplazamiento. Este aumento del error de la posición es debido a la inercia del desplazamiento, que produce pequeños movimientos durante el frenado. Este problema puede resolverse incrementando el tiempo de espera antes de empezar la medida en cada posición.

Calibración del espectroscopio.

La calibración del espectroscopio es importante para comprobar que las medidas que estamos obteniendo son fiables. Es importante comprobar que el grosor medido y el calculado con el programa coinciden, puesto que este grosor es la principal causa de error en el cálculo de los coeficientes. También es importante que la incidencia de los pulsos Terahertzio sea perpendicular a la muestra para minimizar los efectos de la dispersión.

Errores en los coeficientes

Los errores en los coeficientes pueden deberse a diferentes circunstancias. En las frecuencias bajas, al realizar la transformación de Fourier para obtener el espectro, obtenemos una mayor energía en el pulso muestra que en el referencia, por lo que obtenemos valores negativos en el coeficiente de absorción. Este error puede deberse a las múltiples reflexiones internas, a la poca energía que existe en esas frecuencias o a errores en el cálculo de la FFT. Para corregirlo se puede cancelar el eco y/o realizar un filtrado. El error en la determinación del grosor de la muestra causa un error en el cálculo de los coeficientes. Este error solo puede ser corregido minimizando el error en el cálculo del grosor de la muestra.

Ancho de banda del espectroscopio.

En el ancho de banda del sistema intervienen principalmente tres parámetros; la constante del tiempo de vida de los portadores del semiconductor utilizado en la antena, la tasa de muestreo y la sensibilidad del Lock-In Amplifier. Utilizando saltos de posiciones de 10 μm en la línea de desplazamiento tenemos un ancho de banda de unos 7 THz. El semiconductor nos permite un ancho de banda de unos 3,5 - 4 THz. Desafortunadamente, tenemos un ancho de banda de unos 3 THz, así que la sensibilidad del Lock-In Amplifier limita el ancho de banda del espectroscopio.

Distorsión causada por el eco

La distorsión causada por las reflexiones internas es mayor a bajas frecuencias (0-1.5 THz). Aparece tanto en el índice de refracción como en el coeficiente de absorción. La distorsión puede ser eliminada cancelando el eco o aplicando el término de reflexiones Fabry-Perot en el cálculo de los coeficientes. Para poder eliminar esta distorsión una precisa determinación del grosor de la muestra es necesaria.

Cálculo del grosor de la muestra.

Para calcular el grosor de la muestra se puede utilizar cualquiera de los dos parámetros, así como el coeficiente de extinción, aunque el índice de refracción es más preciso al ser las variaciones de amplitud menores. Es importante una buena determinación del grosor para obtener el valor real de los coeficientes. De los dos métodos propuestos el primero es menos preciso pero el rango en el que funciona es mayor, ya que al aumentar el grosor la amplitud de los coeficientes disminuye y por lo tanto el valor de la amplitud de la frecuencia que debemos medir.

Temperatura de la muestra.

Los parámetros calculados presentan dependencia de la temperatura de medida. El índice de refracción no presenta variaciones muy significativas, sin embargo el coeficiente de absorción puede ser muy diferente. Las muestras enfriadas hasta unos 4° K presentan un coeficiente de absorción con mas picos de absorción y mejor diferenciados que en el caso de realizar la medida a temperatura ambiente. Esto es debido a la estructura molecular de la sustancia y a las vibraciones que estas presentan.

7. Manual de usuario

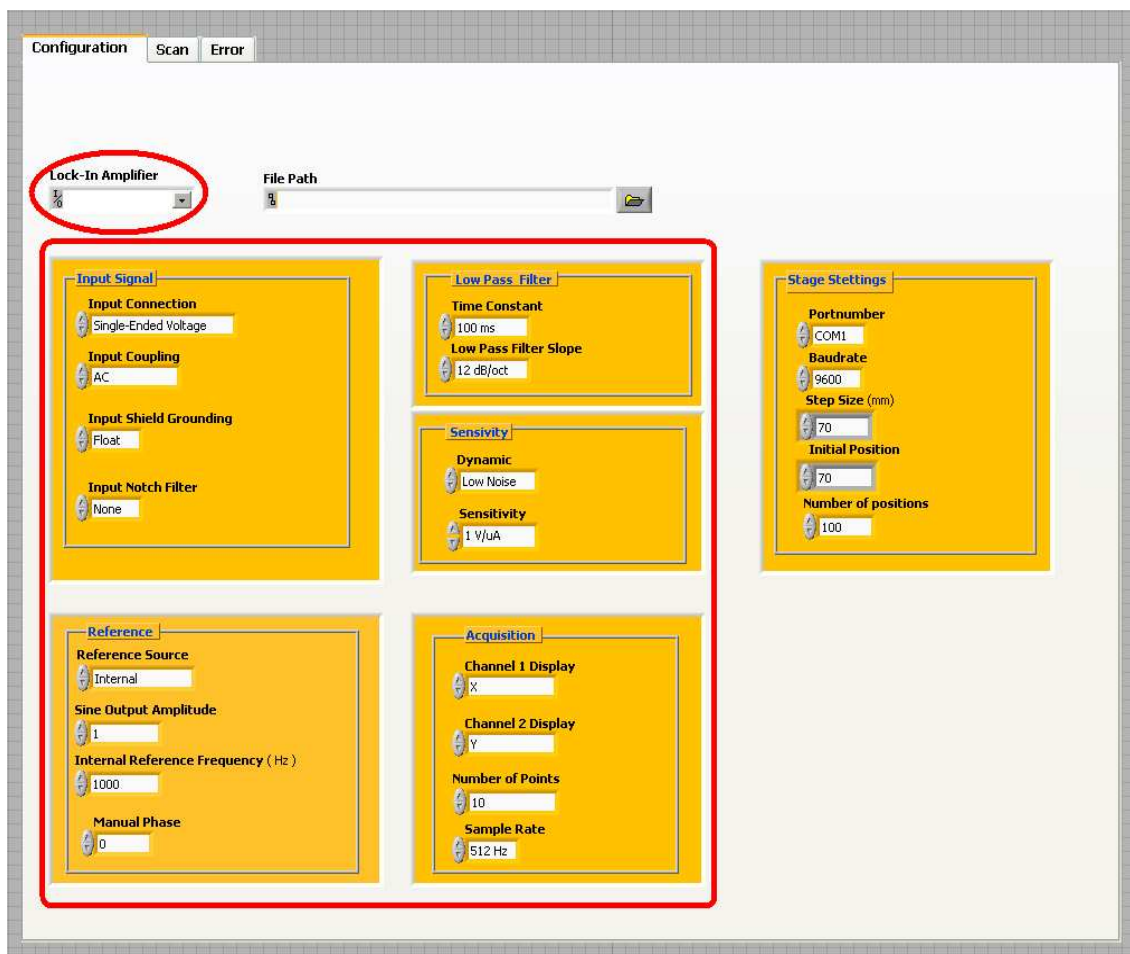
7.1 Manual de usuario del programa Principal

The front panel has three functions; allow users to select the parameters of the measurement, shows the data while the measurement process and if there is an error, showing the code of the error. It is divided in three pages, one for each function.

Configuration Page

The configuration page is used to set the parameters of the Lock-In Amplifier and the delay stage before de measurement.

Initialize the Lock-In Amplifier



The picture shows in red the controls to initialize the Lock-In Amplifier.

- Lock-In amplifier Control is used to select the instrument and its GPIB direction.
- Input Signal Cluster allows setting some parameters related to Input Signal. Input Impedance, Ground, Coupling and Input Filter.
- Reference Cluster sets the parameters of reference signal. It can be removed because our reference is external.
- Low Pass Filter Cluster is used to select the bandwidth of the output filter.

- Sensitivity Cluster sets Sensitivity and Dynamic Reserve values
- Acquisition Cluster permits to select the type of data, the number of samples taken during each iteration and the sample rate of the Lock-In amplifier.

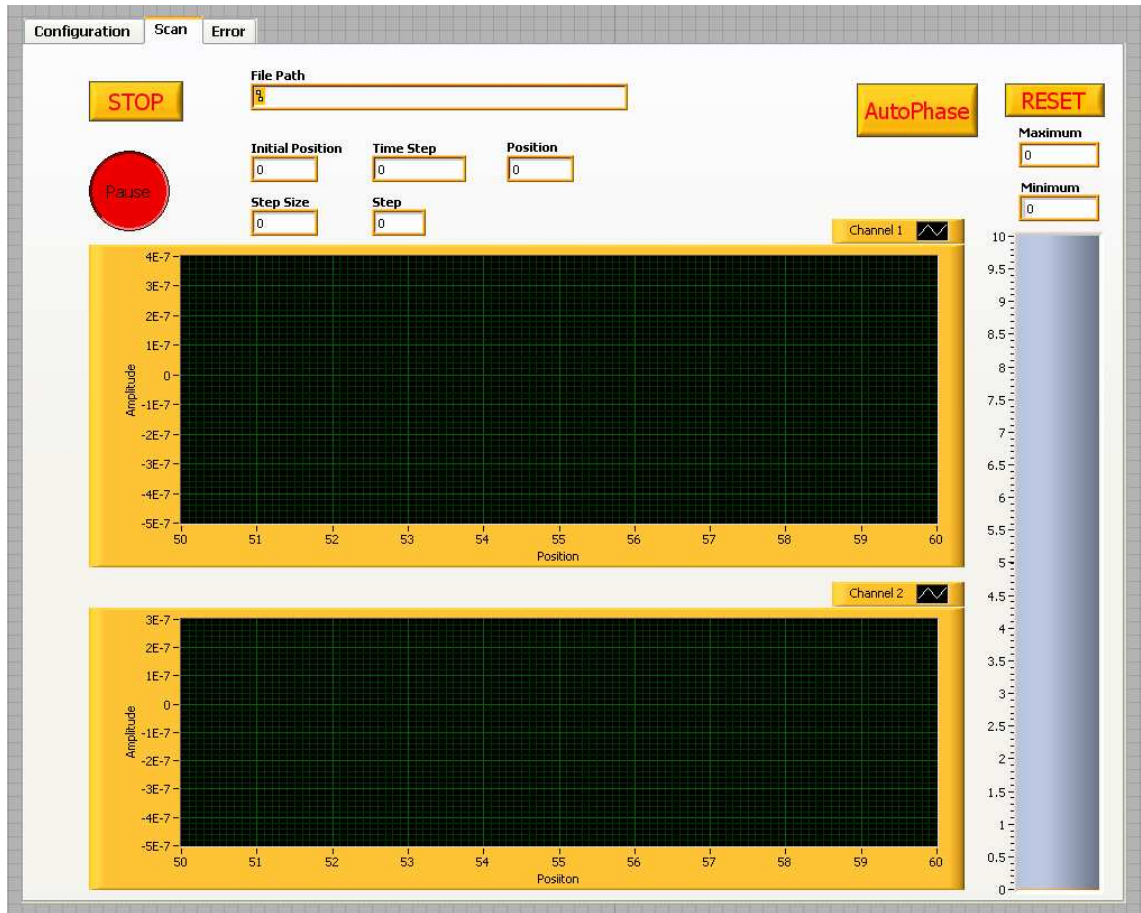
Initialize the Stage

The screenshot shows the 'Configuration' tab of a Lock-In Amplifier software. At the top, there are tabs for 'Configuration', 'Scan', and 'Error'. Below these, there are fields for 'Lock-In Amplifier' (set to 1/20) and 'File Path'. The main area contains several yellow clusters for configuration:

- Input Signal:**
 - Input Connection: Single-Ended Voltage
 - Input Coupling: AC
 - Input Shield Grounding: Float
 - Input Notch Filter: None
- Low Pass Filter:**
 - Time Constant: 100 ms
 - Low Pass Filter Slope: 12 dB/oct
- Sensitivity:**
 - Dynamic: Low Noise
 - Sensitivity: 1 V/uA
- Reference:**
 - Reference Source: Internal
 - Sine Output Amplitude: 1
 - Internal Reference Frequency (Hz): 1000
 - Manual Phase: 0
- Acquisition:**
 - Channel 1 Display: X
 - Channel 2 Display: Y
 - Number of Points: 10
 - Sample Rate: 512 Hz
- Stage Settings (highlighted with a red box):**
 - Portnumber: COM1
 - Baudrate: 9600
 - Step Size (mm): 70
 - Initial Position: 70
 - Number of positions: 100

On the configuration page there is a cluster to initialize the delay stage. It is important to select the correct port number and the baud rate to set the communication between the computer and the stage. The baud rate must be the same in the program and in the controller. The other controls in the cluster are used to choose the initial position, the step size and the number of positions we want to cover. The step size it is related with the sampling frequency of the system.

Scan Page



The scan page is used during the measurement process. Its main function is representing the acquired data and control de execution of the program.

- Each graphic depicts one channel of the lock-in amplifier.
- The tank represents the value of the current sample in the interval between the maximum and minimum values measured.
- Reset button resets the values of maximum and minimum.
- Time Step shows the sampling period
- Position is the current position of the stage
- Autophase button sends the order to actualize the phase of the frequency generated by the lock in amplifier, setting the phase of the reference frequency input.

Error Page

The screenshot shows a software interface with three tabs: Configuration, Scan, and Error. The Error tab is selected. It displays three error handling panels: Lock-in Error, File Error, and Stage. Each panel has a status indicator (green checkmark), a code field (0), and a source field (text area with a clear button).

The program is ended when an error is generated or the measurement is finished. If there is an error it shows its code and the error message. Errors can be produced by the stage, the lock-in amplifier or the file.

7.2 Manual de usuario del programa Busca-Pulsos

This program is used before the main program to find the pulse. It explores the area defined by the user. When an exploration is finished it is possible to start a new one. Then, the user can set the initial position and the number of steps in the main program.

The structure of the program is very similar to the main program but it is no necessary to save the data in a file.

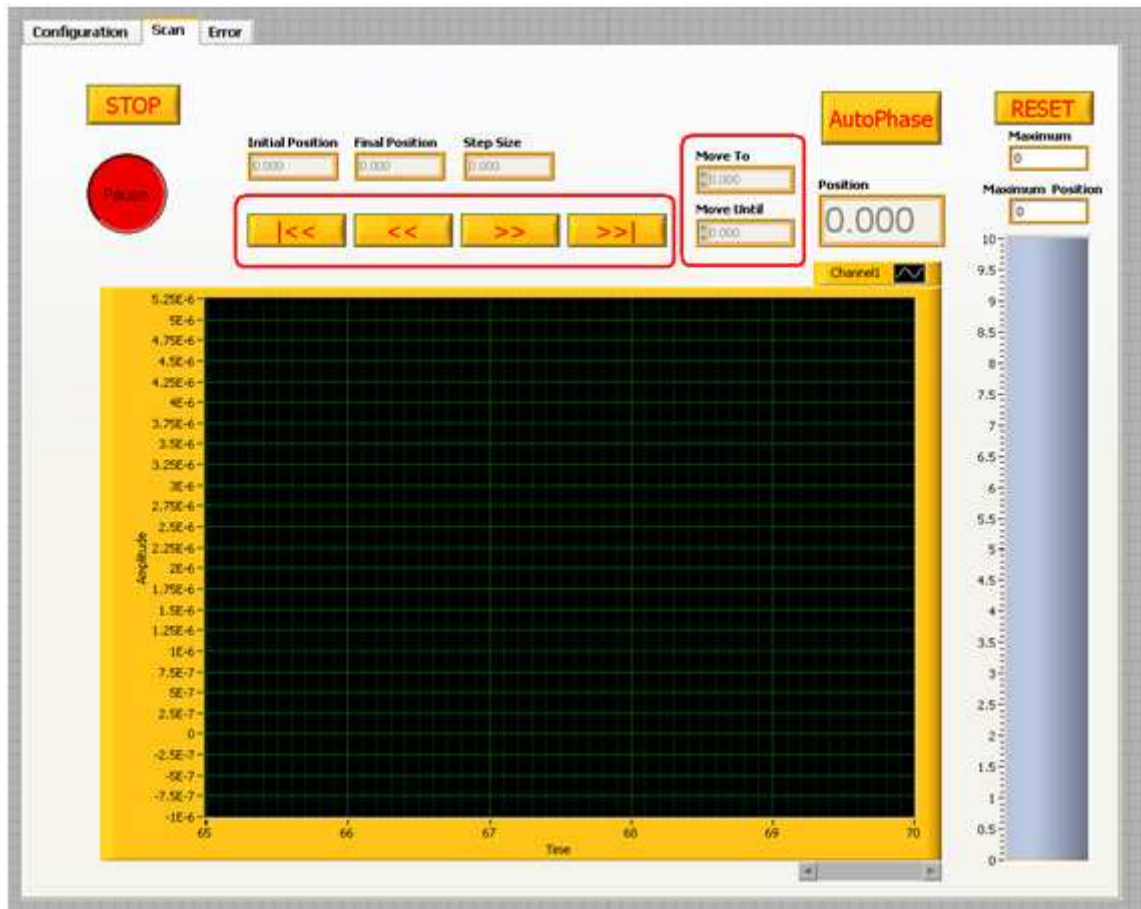
Configuration Page

The configuration page is the same of the Main Program. It permits the configuration of the spectroscopy system. The controls and buttons have the same function than in the other program. It is recommended to use the same configuration in both programs.

The Configuration Page interface includes the following sections and controls:

- Lock-In Amplifier**: A section with a dropdown menu.
- Input Signal**:
 - Input Connection: Single-Ended Voltage
 - Input Coupling: AC
 - Input Shield Grounding: Float
 - Input Notch Filter: None
- Low Pass Filter**:
 - Time Constant: 100 ms
 - Low Pass Filter Slope: 12 dB/oct
- Sensitivity**:
 - Dynamic: Low Noise
 - Sensitivity: 1 V/ μ A
- Stage Settings**:
 - Portnumber: COM1
 - Baudrate: 9600
 - Step Size (mm): 70
 - Initial Position: 70
 - Number of positions: 100
- Reference**:
 - Reference Source: Internal
 - Sine Output Amplitude: 1
 - Internal Reference Frequency (Hz): 1000
 - Manual Phase: 0
- Acquisition**:
 - Channel 1 Display: X
 - Channel 2 Display: Y
 - Number of Points: 10
 - Sample Rate: 512 Hz

Scan Page



The scan page is also very similar but now there are same buttons to control the stage movement.



Moves stage continuously on the left sense



Moves the stage one position on the left sense

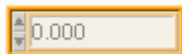


Moves the stage one position on the right sense



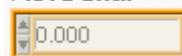
Moves the stage continuously on the right sense

Move To



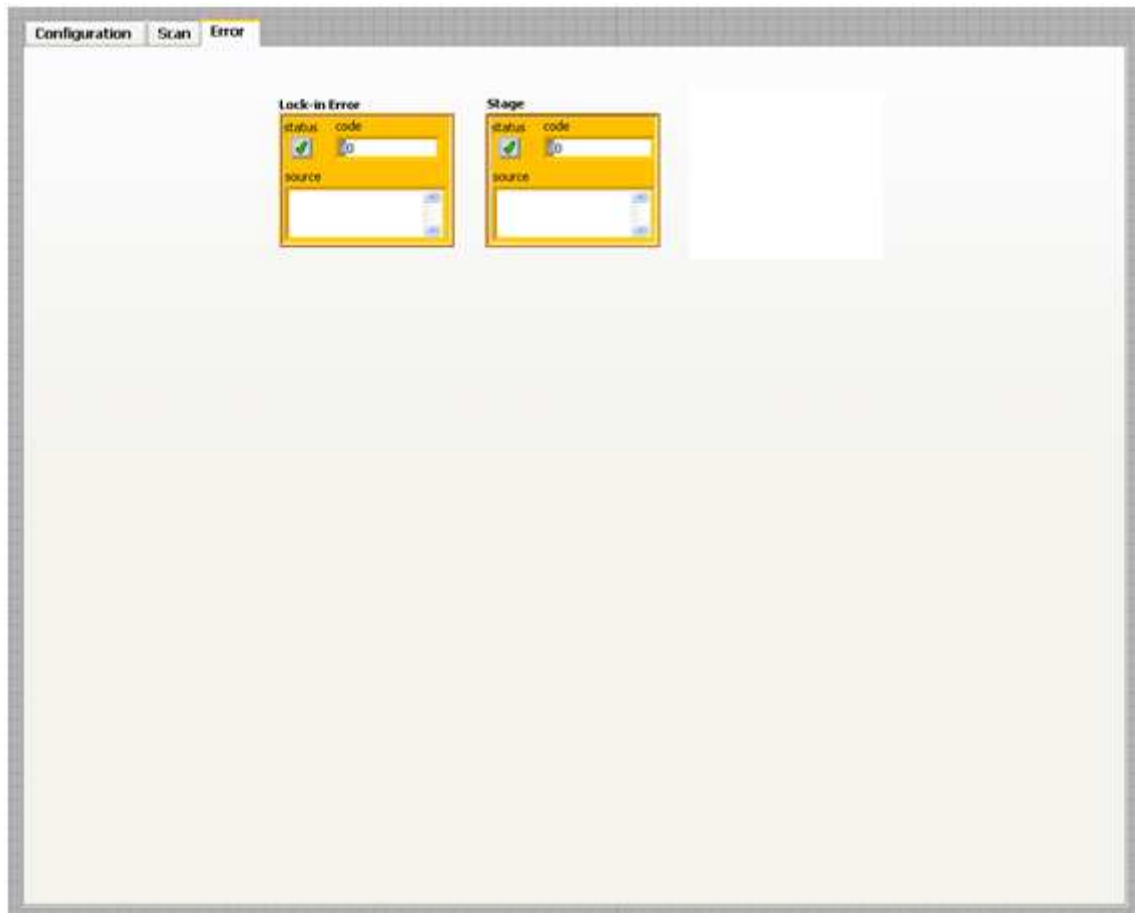
Moves the stage to this position

Move Until



Moves the stage until this position

Error Page

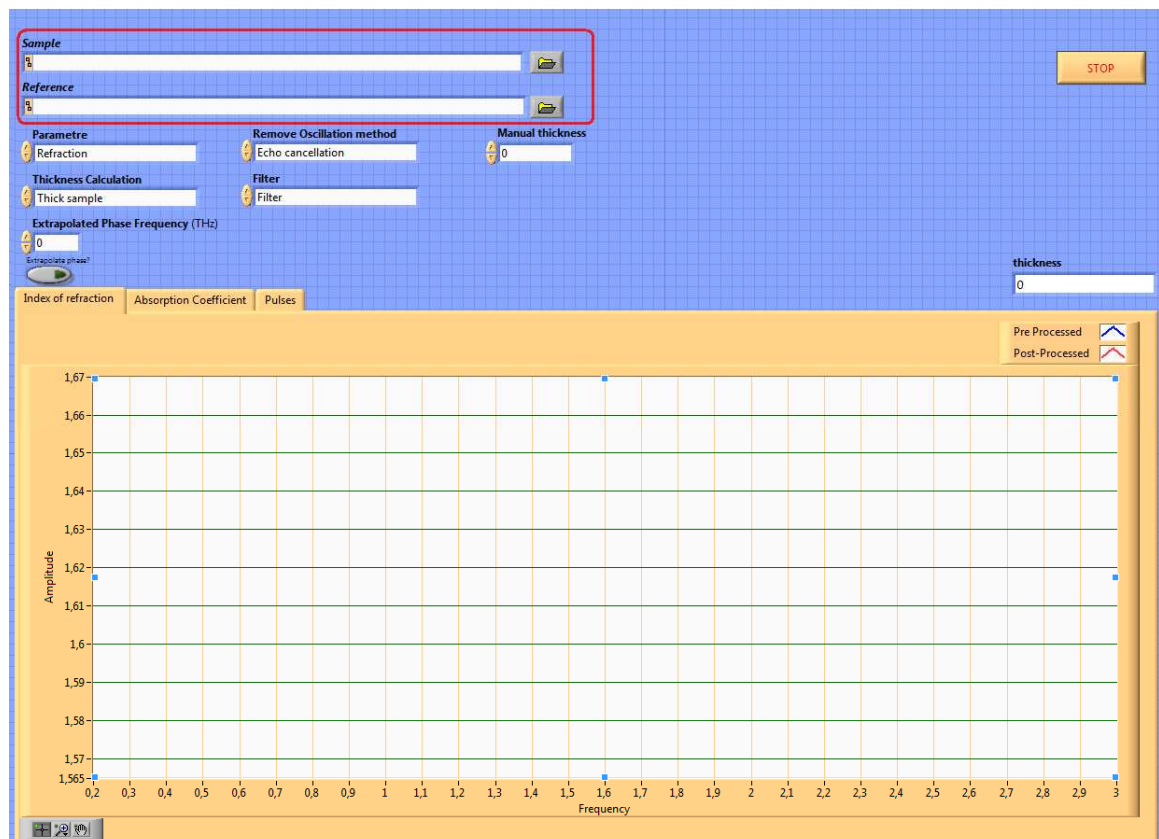


The error page shows the errors produced during the measurement process. In this case there are only two error sources, the Lock-In Amplifier and the Stage. There is no file error because the program doesn't save the data in a file.

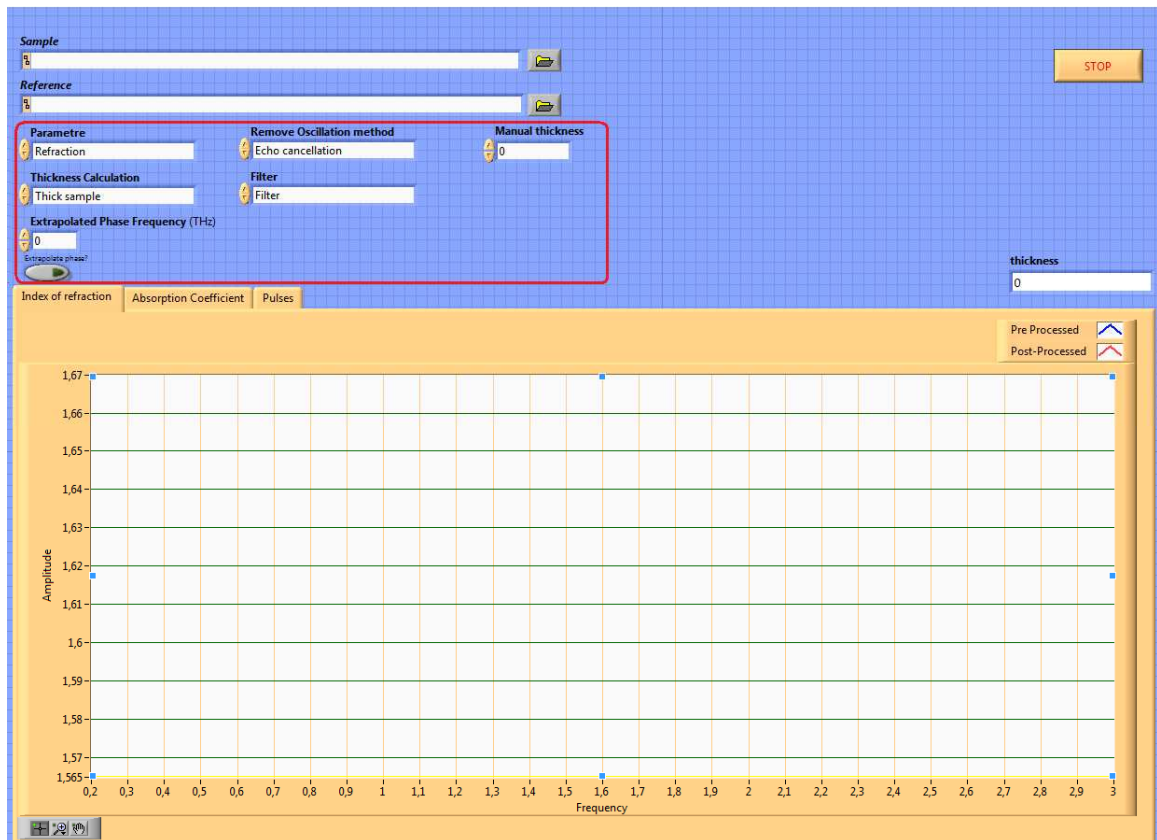
7.3 Manual de usuario del programa ‘Coeficientes’

The Coefficients program calculates the index of refraction and the absorption coefficient from the pulses measured with the Main Program. It realized the signal processing given the users many options to improve the representation of these parameters.

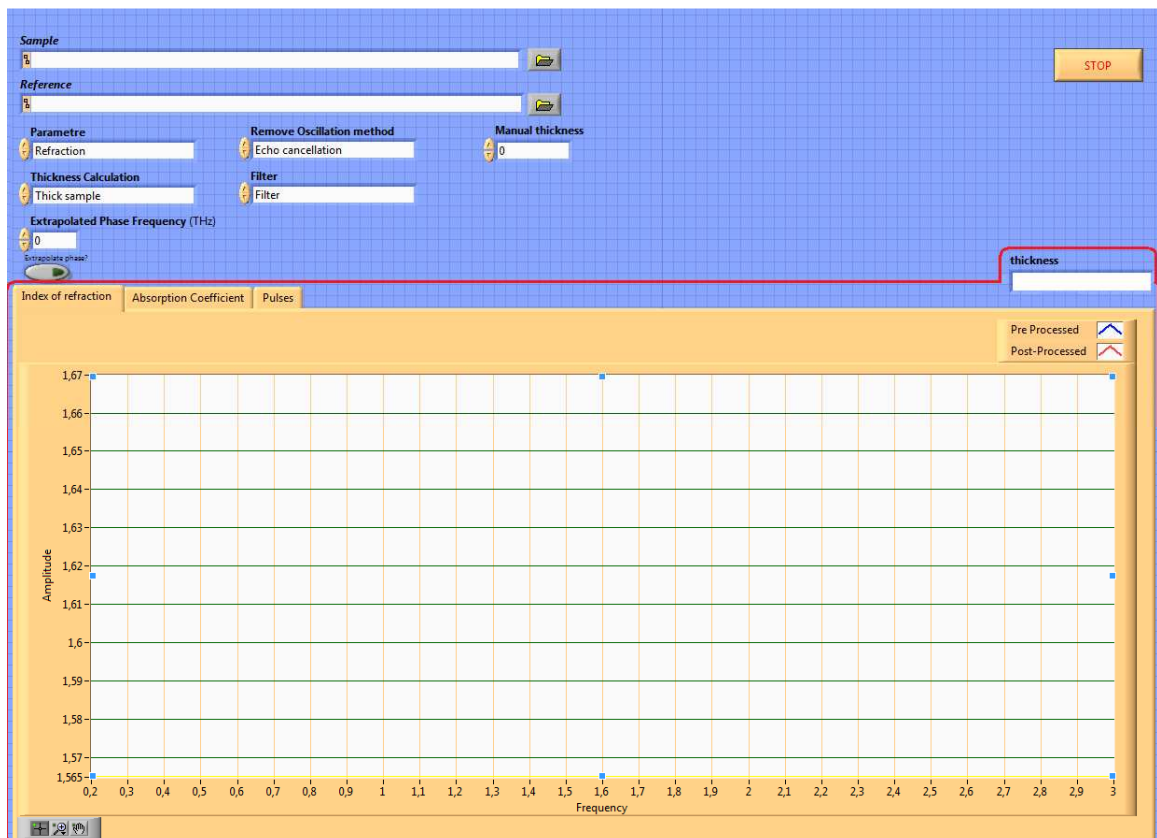
It also determinates the thickness of the sample and allows phase extrapolation if it is needed.



The signal processing could be realized with the controls of the Coefficients program. It shows the coefficients before and after the signal processing. The user could change the options and recalculate the parameters and save the representation he prefers.



- Thickness calculation control permits to select the thickness calculation method. Thickness could be set manually.
- Manual thickness is the thickness measured manually. The control works when the option 'manual' is selected in the Thickness Calculation control.
- Remove oscillation method allows the elimination of oscillation in the coefficients with two different methods, echo cancellation or Fabry-Perot term. It is possible also not to remove the oscillation.
- Filter sets the filter applied to the absorption coefficient. The absorption coefficient could be filter complete or only the low frequencies. The index of refraction is also filtered to remove the noise. No filtering is also possible.
- Extrapolate phase? makes available the phase extrapolation.
- Extrapolate phase frequency sets the higher frequency extrapolated.



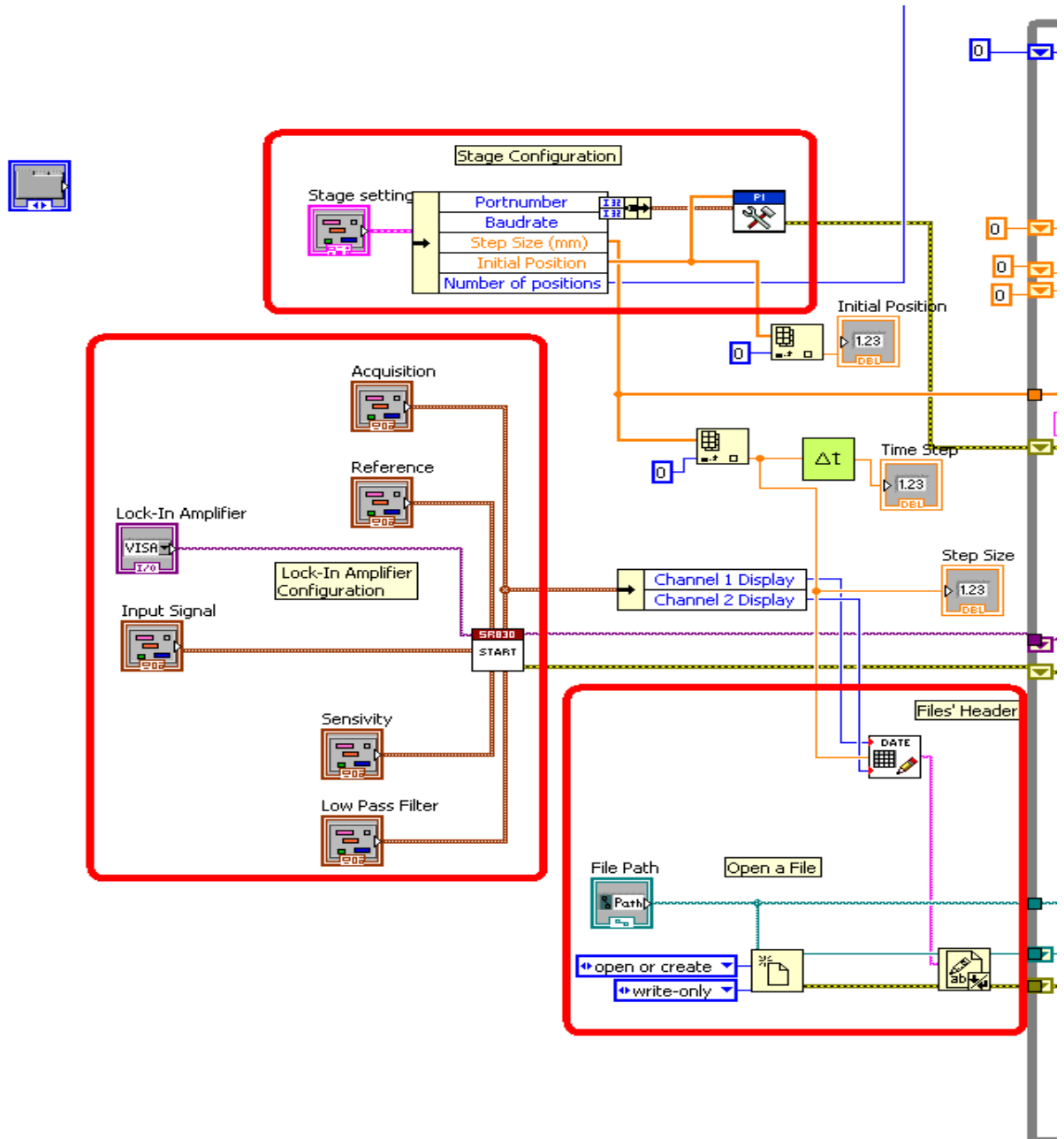
- The index of refraction page shows the index of refraction pre-processed and post-processed.
- The absorption coefficient page depicts the absorption pre-processed and post-processed.
- The Pulses page shows the pulses save in the files by the spectroscopy system.
- Thickness indicates the thickness calculated with the method chosen. If the Thickness Calculation method is set as 'manual', the thickness indicator shows the value introduced with the Manual Thickness control.
- Stop button ends the program.

8. Manual del programador.

8.1 Manual del programador del programa Principal

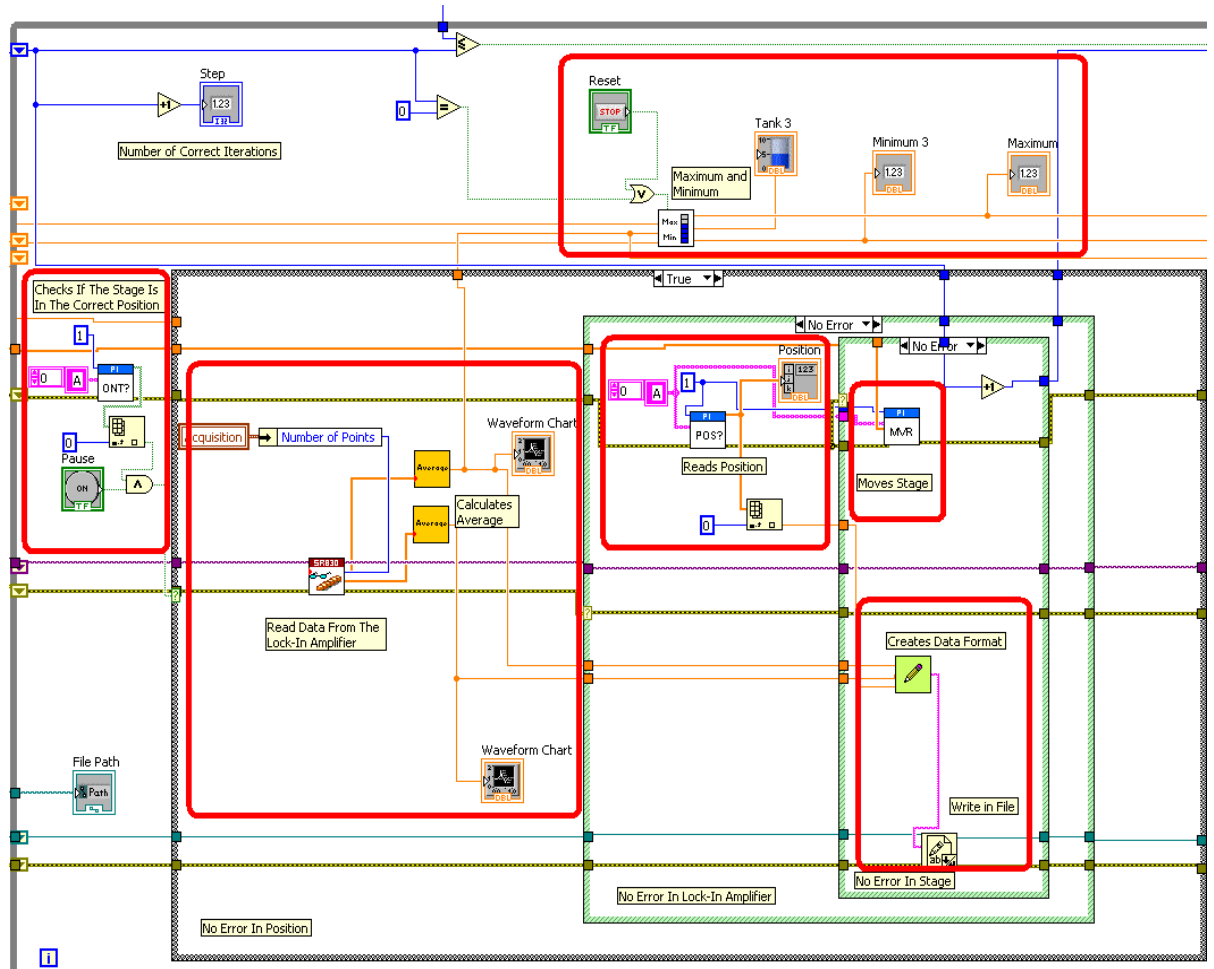
The Block diagram of a Labview program is the structure of the program. This program has three general parts, Configuration, Main loop and Events Loop.

Configuration



First, the program sets the communication with the instruments and configures them. It is possible to distinguish three parts: one to configure the Stage, other to configure the Lock-in Amplifier and another one to create a new file.

Main Loop



The main loop of the program takes data, moves the Stage and saves data.

First, it checks if the Stage is in the correct position sending the corresponding request. If it is true, the program reads data from the lock-in amplifier and calculates the data average. Then the program reads the position of the stage. After, the stage is moved and the averages and the position are written in the file. There is also a function to calculate the maximum and minimum values.

Case structures are used to detect errors and to guarantee the execution order.

The main loop is finished when an error occurs, all the positions are measured or when the user stops it manually by pushing the stop button.

Date and Magnitudes.vi



It gets the date and the magnitudes measured and change their format to save them in the file.

Dt.vi



It converts the Step Size into a Time delay

Read data.vi



It reads data from Lock-In amplifier. We get two arrays with the data from channel 1 and channel 2

ONT?.vi



It checks if the Stage has finished the last movement send.

POS?.vi



It gets the current position of the Stage

MVR.vi



It moves the stage

Average.vi



It calculates the average of the samples. Input is an array format.

Data format.vi



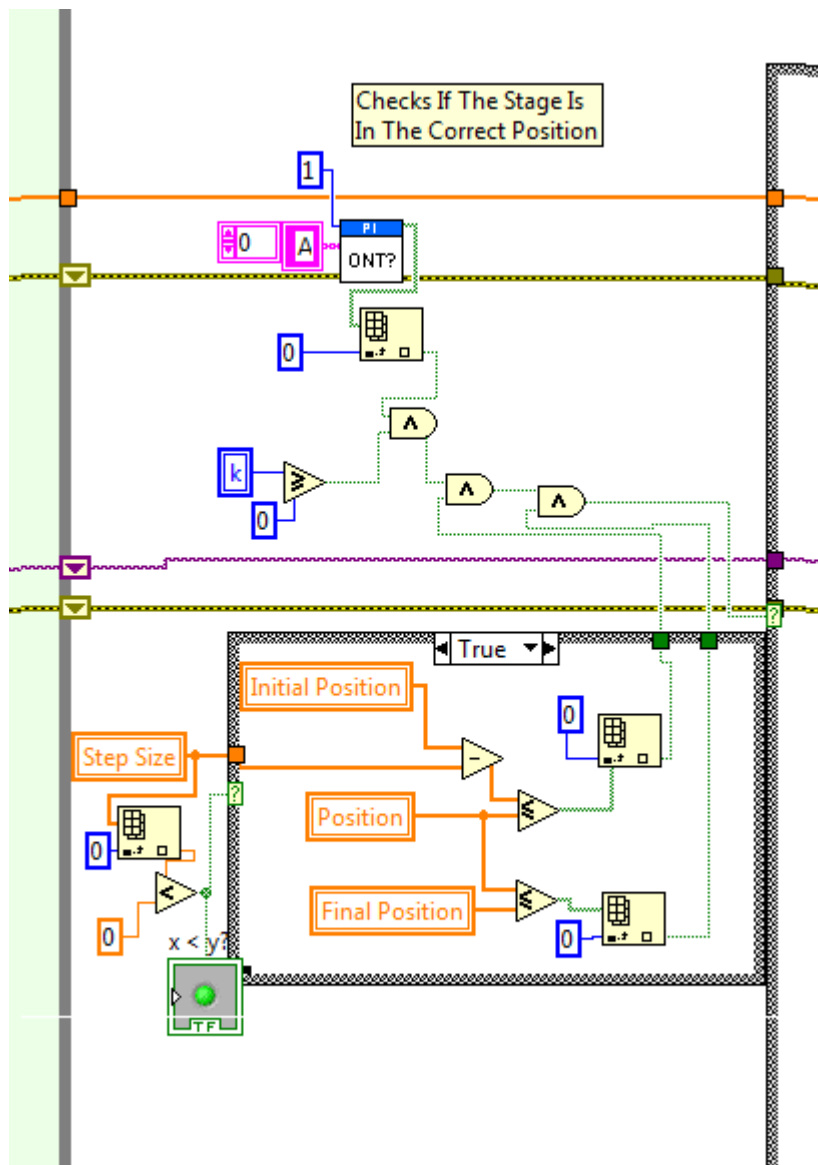
It changes the data format to save it in the file

MaxMin.vi



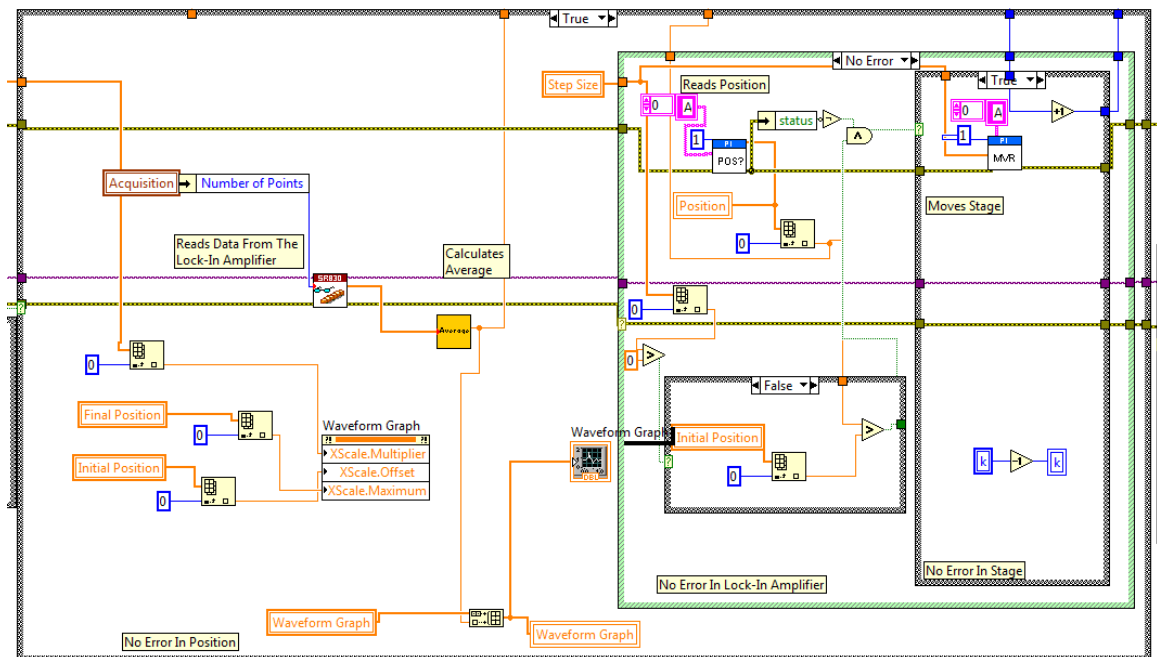
It calculates maximum and minimum.

Main Loop

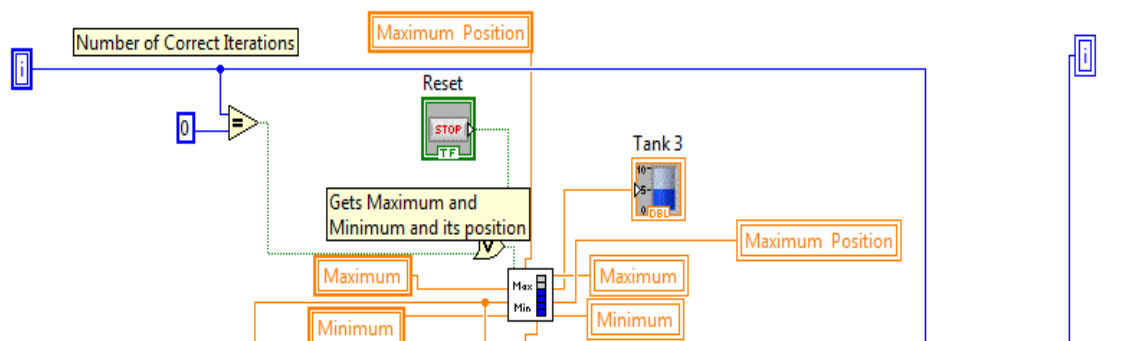


The main loop starts checking if the stage is in the correct position. Then, it checks if the area has been explored completely. If it has been explored completely the program continues executing until the user push the stop button but it does nothing. If the exploration has not been finished it measures the value of the signal in the next position.

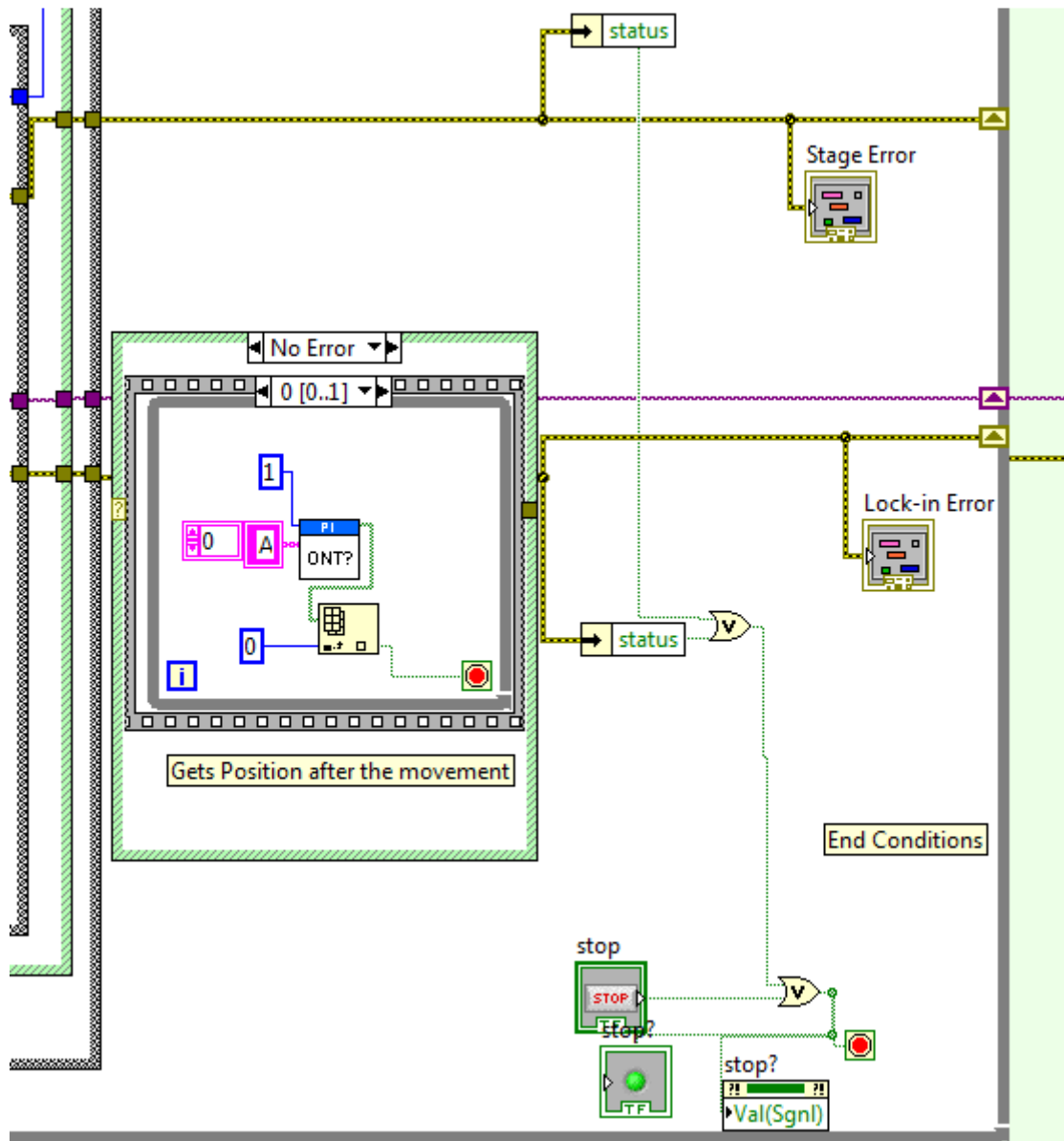
The case structure is controlled by the sense of the movement. It determinates the initial position and the final position of the movement.



This part of the program is the same of the Main program. The program reads the data from the Lock-In Amplifier gets the position and finally moves the stage to the next position. In this case the scales of the graphics are actualized in each iteration. They are determinate by the initial and final position calculated before.

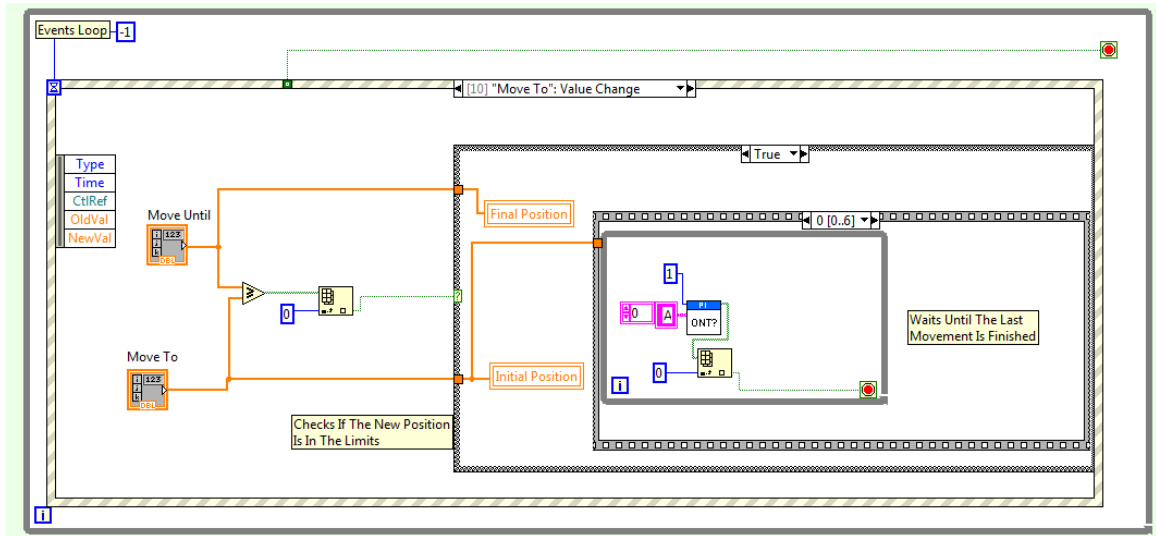


The Maximum and minimum position are calculated with the MaxMin.vi function. The values of the maximum and minimum are saved in the variables. They are reseted when the user pushes the Reset button or a new exploration begins.



The last part of the main loop reads the position of the stage after the movement and checks if an error has occurred. A signal is sent to the events loop when the program is finished.

Events Loop



This loop controls the interruptions generated by users or by the program. This loop is executes some actions when the user pushes a button or changes any value on the configuration page during the exploration.

When the user modifies the initial and the final position of the exploration it moves the stage to the first position, sets the sense of the stage and initialize the exploration. Each case in the loop is the code of the program that is executed when the interruption has occurred.

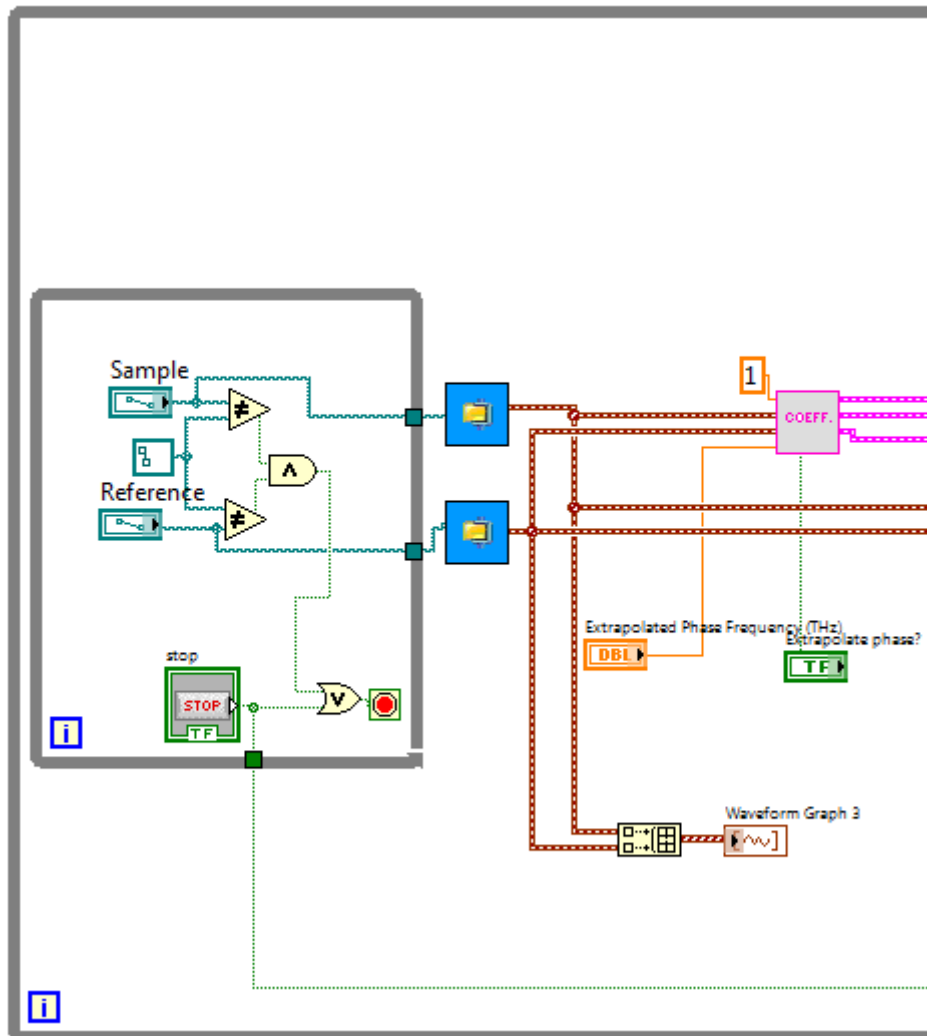
Event loop is finished immediately after the main loop is finished.

8.3 Manual del programador del programa ‘Coeficientes’

The coefficient program could be separated in four parts. The first one reads the files created by the Lock-In Amplifier, the second calculates the thickness of the sample, the next one eliminates the oscillations, the fourth one filters the signal and the last one save the coefficients in a file.

Reading the files

This is the first part of the program. It reads the files created by the Lock-In Amplifier.

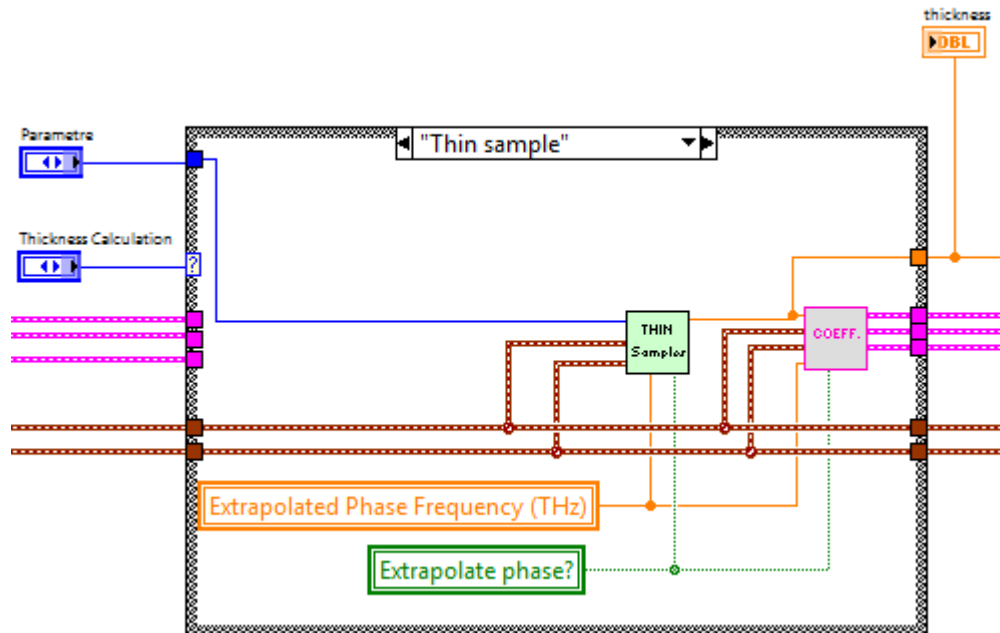


The files are read by the ReadFiles.vi function. Then, the coefficients are calculated using a thickness of 1 m. The function CoefficientsCalculation.vi allows phase extrapolation.

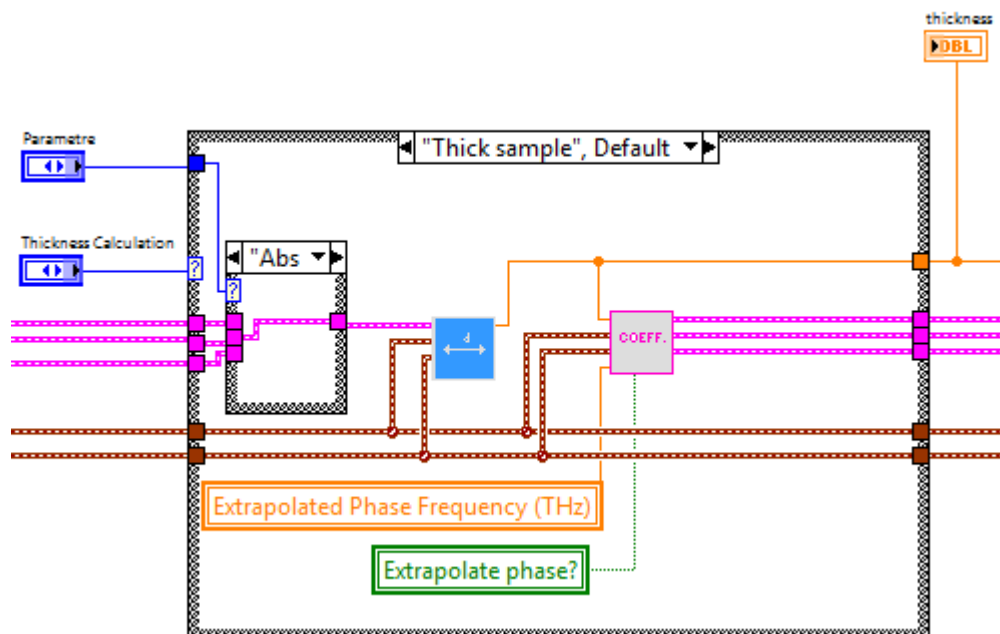
The program finishes when the stop button is pushed.

Thickness calculation options

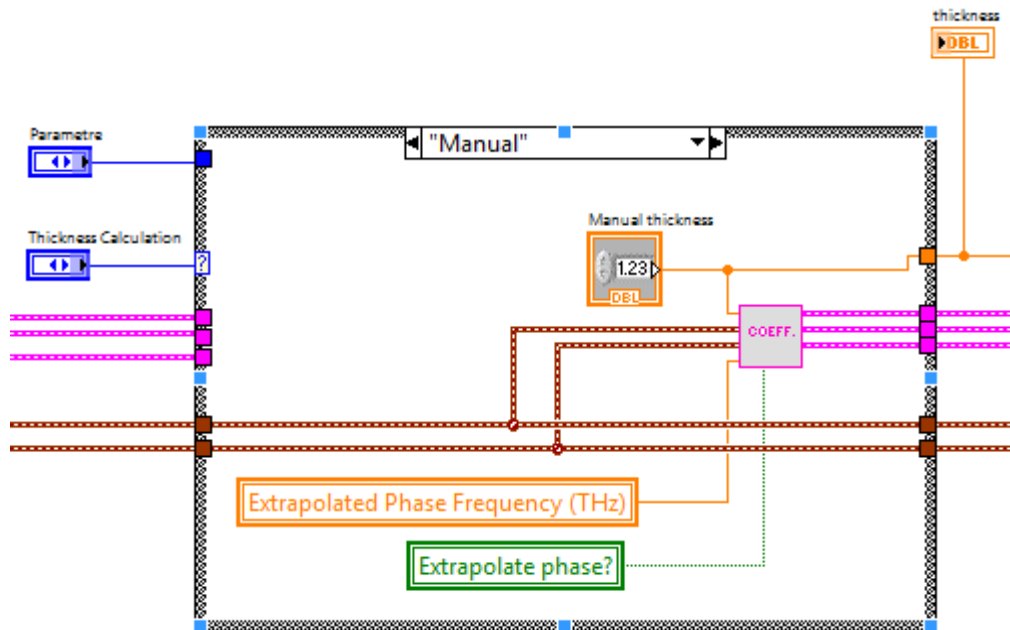
The simple thickness is calculated in this part of the program. It also calculates the coefficients with the correct thickness. The parameter used in thickness calculation could be the index of refraction, the absorption coefficient or the extinction coefficient. There are three options to set the thickness of the sample.



It calculates the thickness using the thin samples algorithm



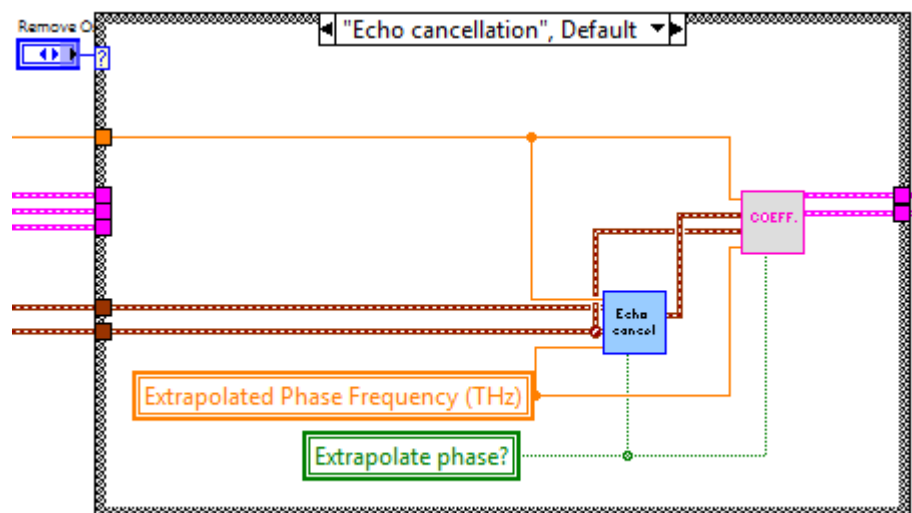
It calculates the thickness using the thick samples algorithm



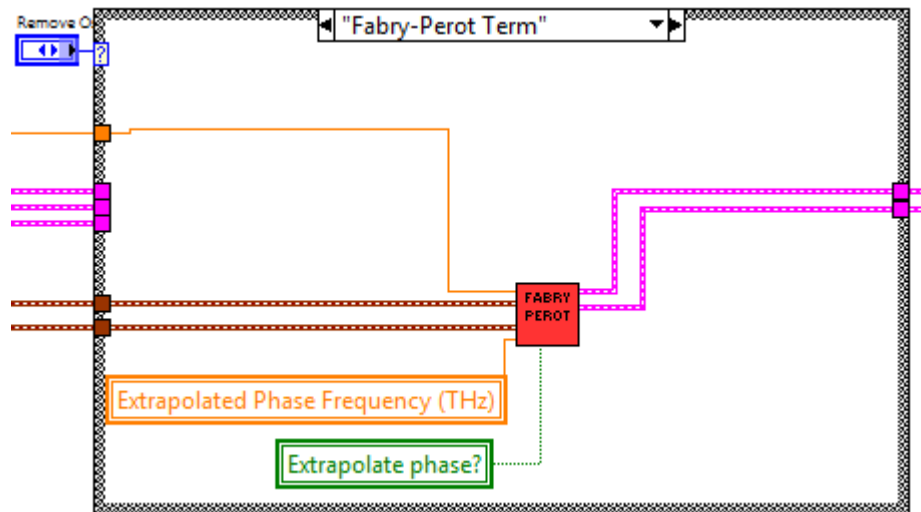
The thickness is measured manually and it is introduced in the program with the 'Manual Thickness' control.

Removing oscillation options

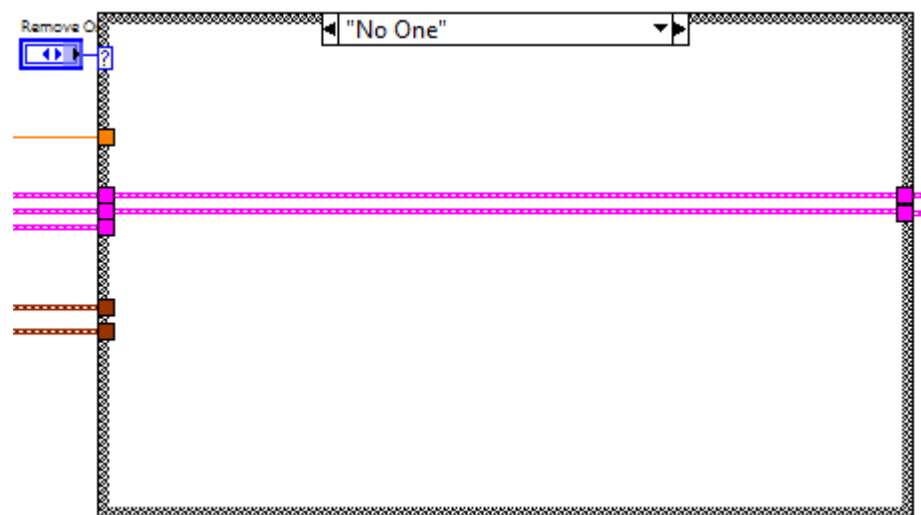
It is a case structure with different options to remove the oscillation. Oscillation could be removed using the Fabry-Perot term or by cancelling the echo in the temporal signal. It is also possible not to remove the oscillations.



It removes the oscillation by cancelling the echo in the temporal signal. The function echo cancellation removes the echo and then the coefficients are calculated again.



Oscillations are removed by introducing the Fabry-Perot term in the coefficients calculation.

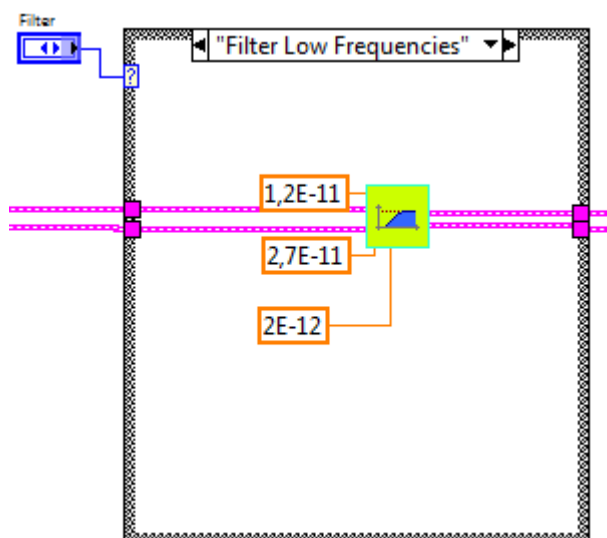
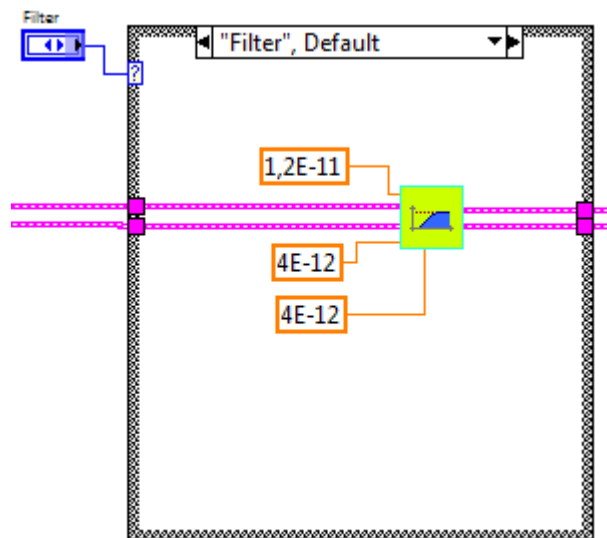


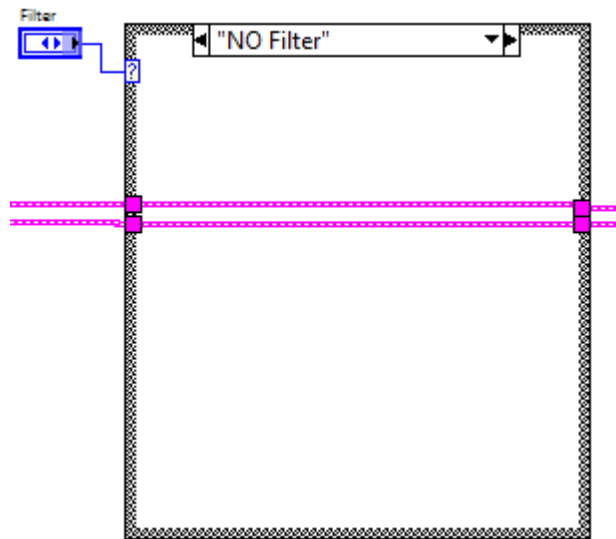
Oscillations are not removed if the user selects this option.

Filter options

The filter option chosen depends on the waveform of the absorption coefficient. The option 'Filter' filters the whole coefficient with the same filter. It should be used when there are any high peaks in the coefficient. The option 'Filter Low Frequencies' filter the low frequencies with a narrow filter and the high frequencies with a wide one. It is used when there are peaks in the coefficient.

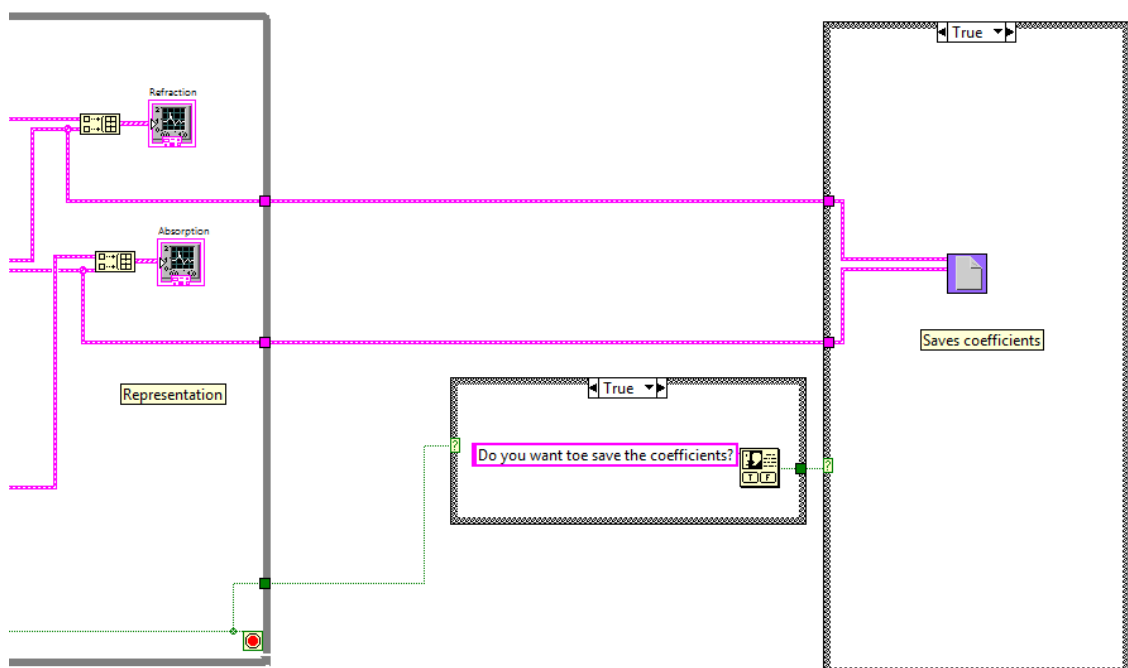
The first value indicates the bandwidth of the low pass filter applied to the refractive index. The other two values are the bandwidth applied to the absorption coefficient, the first one to the low frequencies of the coefficient and the second one to the higher ones.





The coefficients are not filtered.

Representation and coefficients saving



The parameters are showed before and after the signal processing. When the users find the best representation of the coefficients he can save them in a file. The program ends when the stop button is pushed. Then, the program asks the user to save the coefficients. In case of an affirmative answer, a new dialog box is asking for the path where the coefficient will be saved.

Descriptions of sub- Vis

Read Files.vi



It reads the files produced by the spectroscopy system.

Coefficients calculation.vi



It calculates the coefficients from the pulses.

Thin samples.vi



It executes the algorithm to calculate the thickness in thin samples.

Thick samples.vi



It calculates the thickness in thick samples.

Echo cancellation.vi



It removes the oscillation cancelling the echo.

Fabry Perot.vi



It removes the oscillation applying the Fabry-Perot term.

Filter.vi



It filters the coefficients.

Save coefficients.vi



It saves the coefficients in a file.

9. Bibliografía.

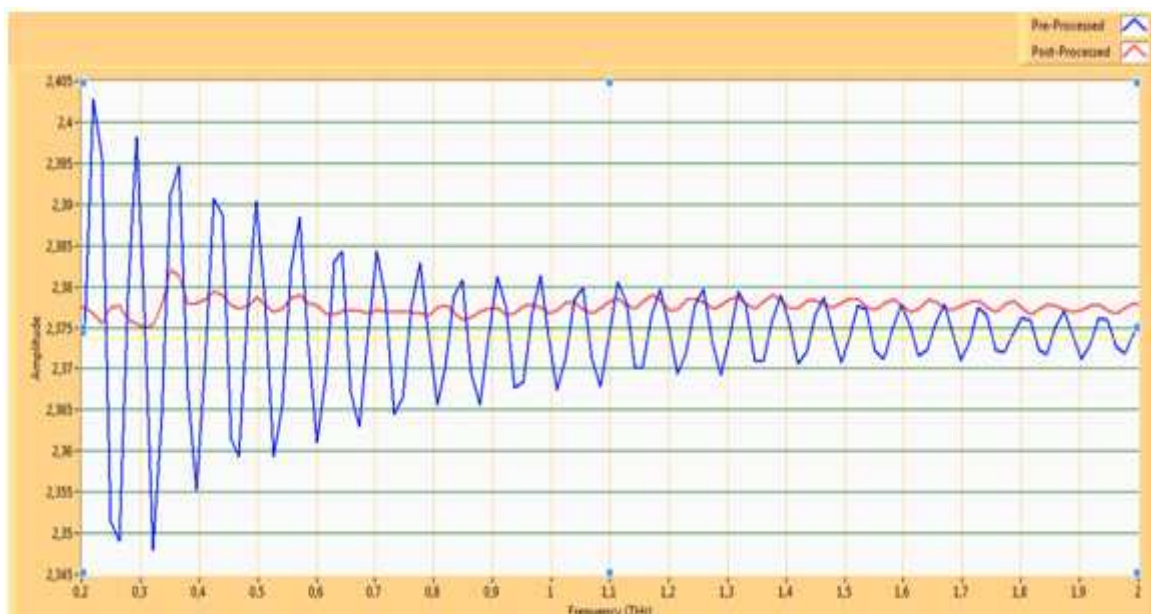
- [1] JEGATHISVARAN BALAKRISHNAN.(2010).Developments in double-modulated terahertz differential time domain spectroscopy.
- [2] BERND MICHAEL FISHER.(2005).Broadband THz Time-Domain spectroscopy of biomolecules.
- [3] MAIK SCHELLER, CHRISTIAN JANSEN, MARTIN KOCH.(2008). Analyzing sub-100um samples with transmission terahertz time domain spectroscopy.
- [4] LIONEL DUVILLARET, FREDERIC GARET, JEAN-LOUIS COUTAZ (1999). Highly precise determination of optical constants and sample thickness in time-domain spectroscopy.
- [5] LIONEL DUVILLARET, FREDERIC GARET, JEAN-LOUIS COUTAZ (1996). A reliable method for extraction of material parameters in Terahertz Time-Domain Spectroscopy.
- [6] V.V. KUBAREV (2009). Optical Properties of CVD-diamond in Terahertz Range and Its Applications on the NovoFEL.
- [7] TONGJUN ZHANG, ANLI TAO, SHASHA YAN (2008). Terahertz time-domain spectroscopy of crystalline glucose and galactose.
- [8] PETER UHD JEPSEN, DAVID G. COOKEL, MARTIN KOCH (2011). Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications

10. Anexos

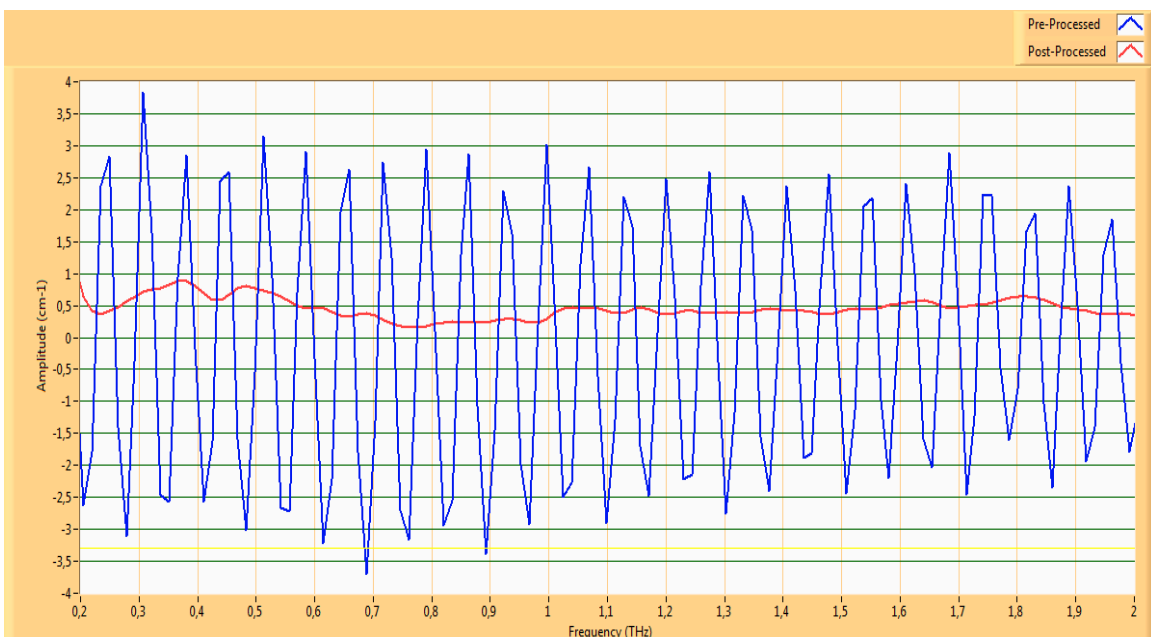
10.1. Anexo I. Gráficas y resultados.

Diamante

La muestra de diamante es la utilizada para realizar la calibración del sistema. La muestra se midió manualmente obteniendo un grosor de 920 μm y con el programa 'Coeficientes' obtuvimos un grosor de 922 μm . Aplicando la cancelación de eco de la señal y realizando un pequeño filtrado para suavizar las curvas obtenemos los siguientes parámetros.



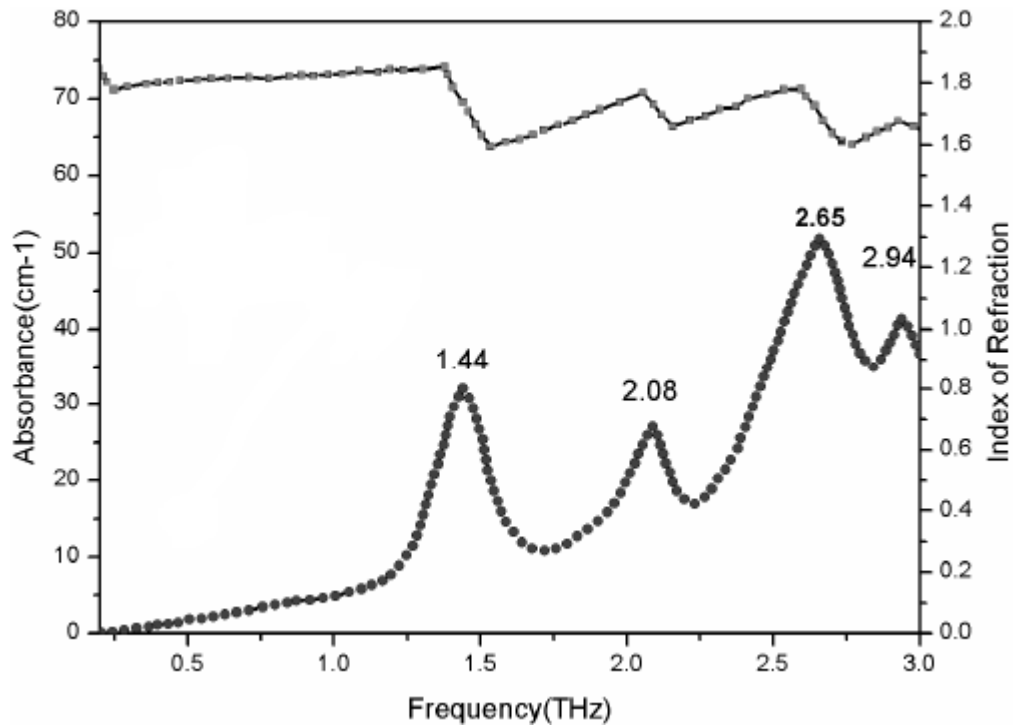
Índice de refracción del diamante



Coeficiente de absorción del diamante

Glucosa

La glucosa ha sido también otro de las sustancias utilizadas para la calibración del sistema. Las medidas tomadas han sido comparadas con otras realizadas por Zhang, Tao y Yan [7].

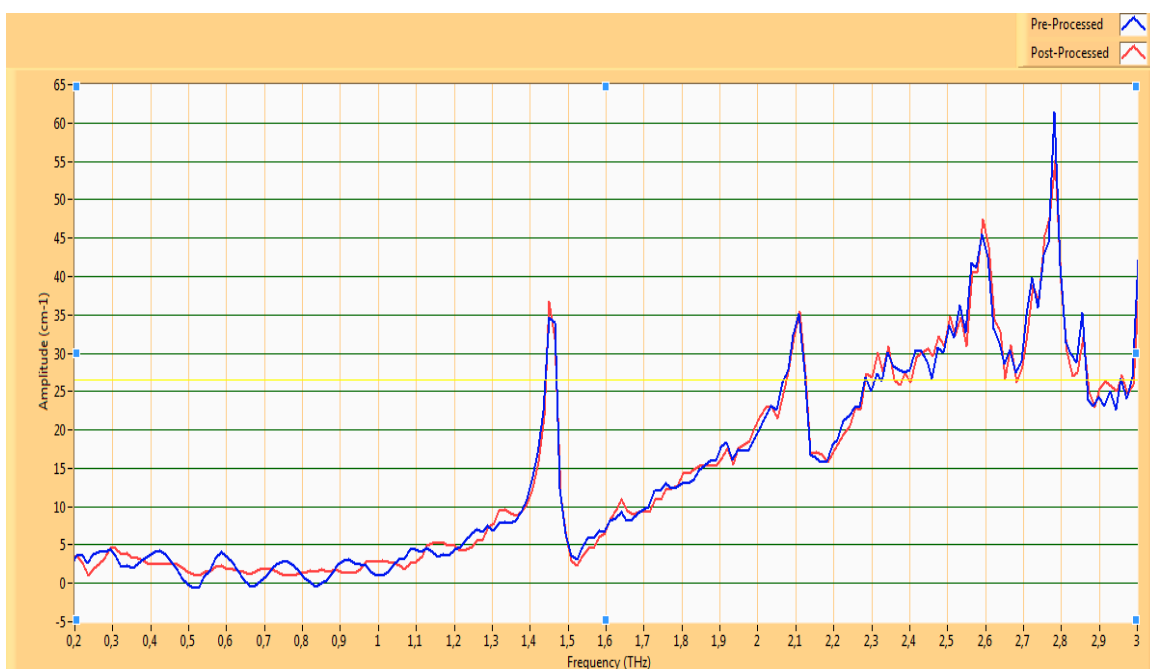


Índice de refracción y coeficiente de absorción de la glucosa [7].

Se midió la substancia manualmente y se obtuvo un grosor de 550 μm . El valor calculado por el programa fue 566 μm . En el cálculo de los parámetros se ha utilizado la técnica de cancelación de eco.



Índice de refracción de la glucosa medido en el laboratorio

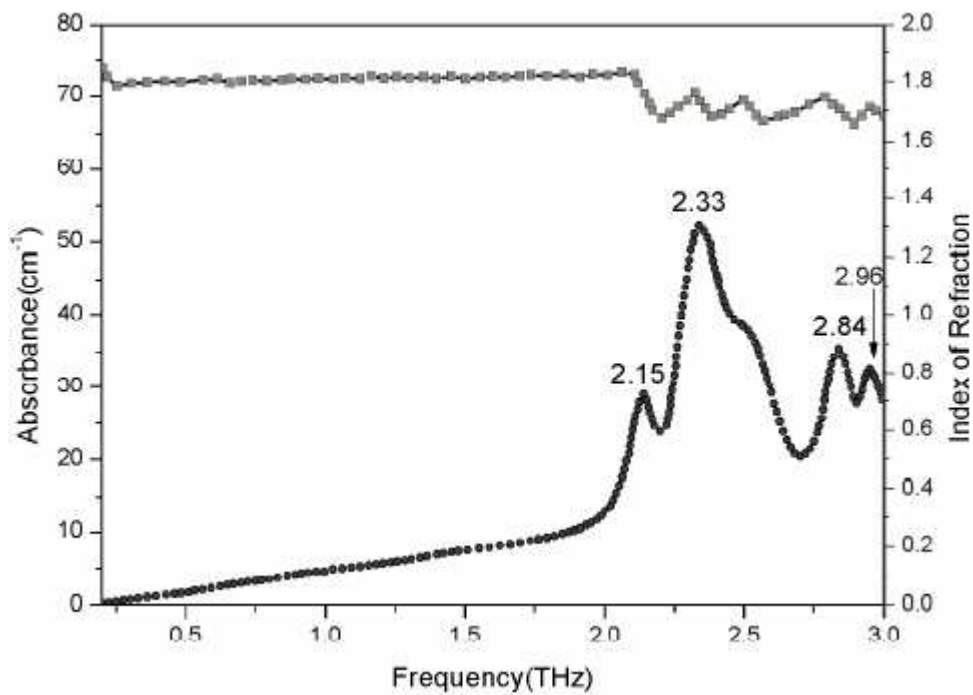


Coefficiente de absorción de la glucosa medido en el laboratorio.

El valor del coeficiente de absorción medido difiere ligeramente del valor teórico [7]. Esto es debido a un error del programa en la determinación del grosor de la muestra. Los picos del coeficiente de absorción se corresponden con los teóricos, por lo que la medida de los pulsos por parte del espectroscopio es correcta.

Galactosa

Una tercera sustancia con la que se calibró el espectroscopio fue la galactosa. Se midió un grosor de 920 μm y el programa calculó un grosor de 922 μm .

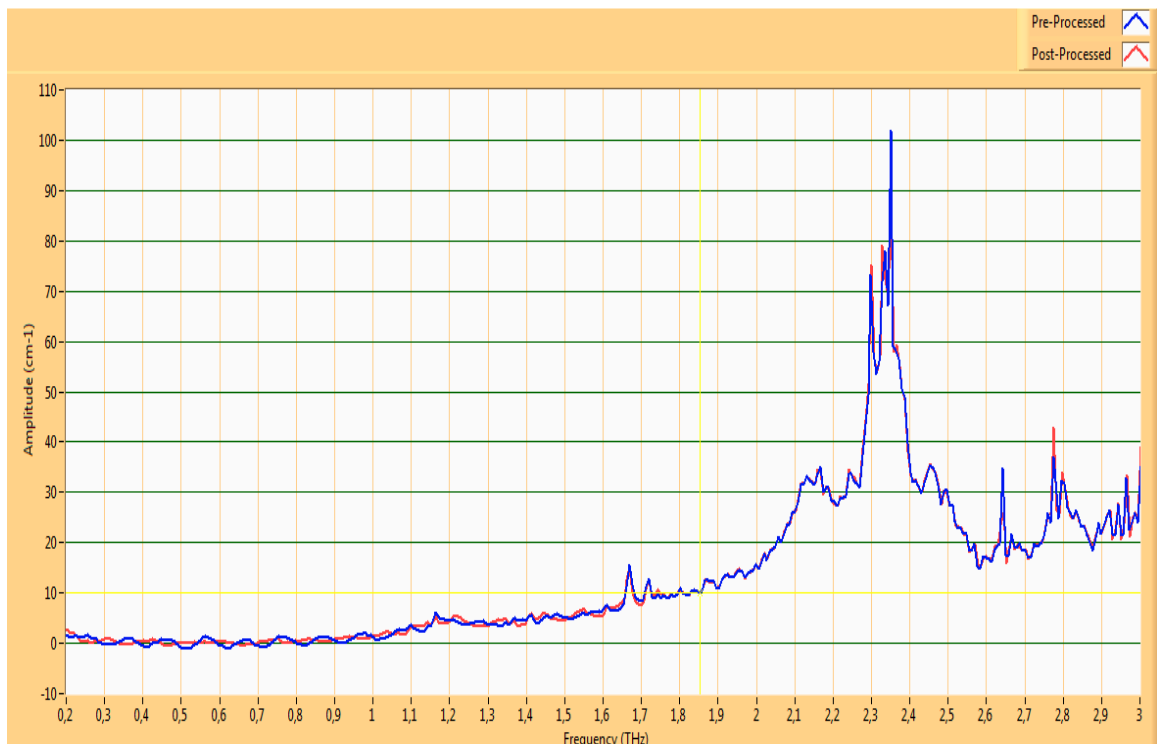


Índice de refracción y coeficiente de absorción de la galactosa [7].

En el cálculo de los coeficientes se realizó la cancelación del eco.



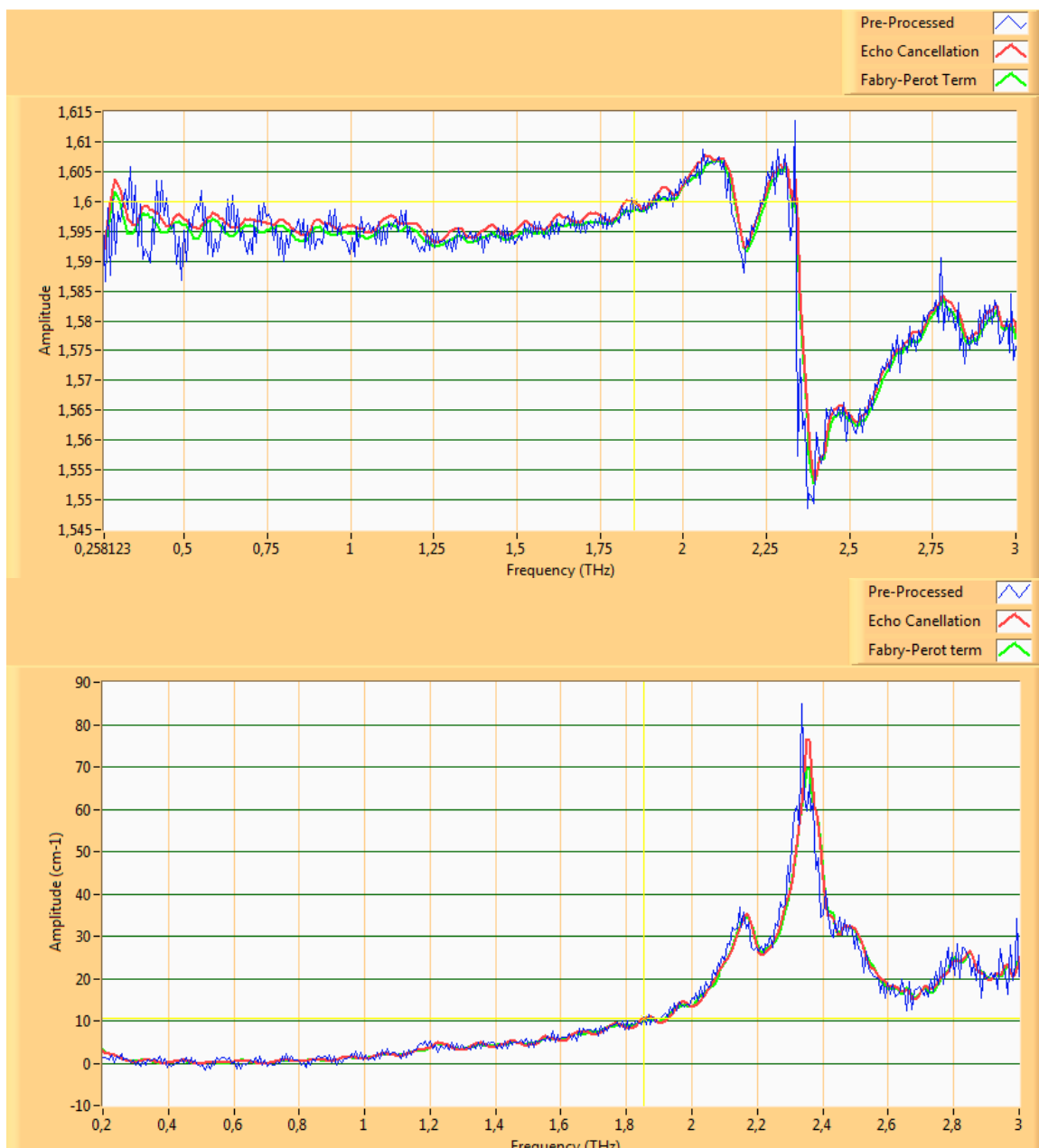
Índice de refracción de la galactosa medido en el laboratorio



Coeficiente de absorción de la galactosa medido en el laboratorio

Los picos del coeficiente de absorción se corresponden con los que aparecen teóricamente, aunque en este caso el pico principal tiene una mayor amplitud. Esto puede ser debido al cálculo de la FFT de los pulsos o a que se ha realizado un filtrado en los coeficientes teóricos.

Se ha realizado una comparativa entre los dos métodos propuestos para la eliminación de las ondulaciones. En este caso podemos comprobar que la eliminación de dichas ondulaciones por cualquiera de los dos métodos produce resultados similares en los coeficientes.



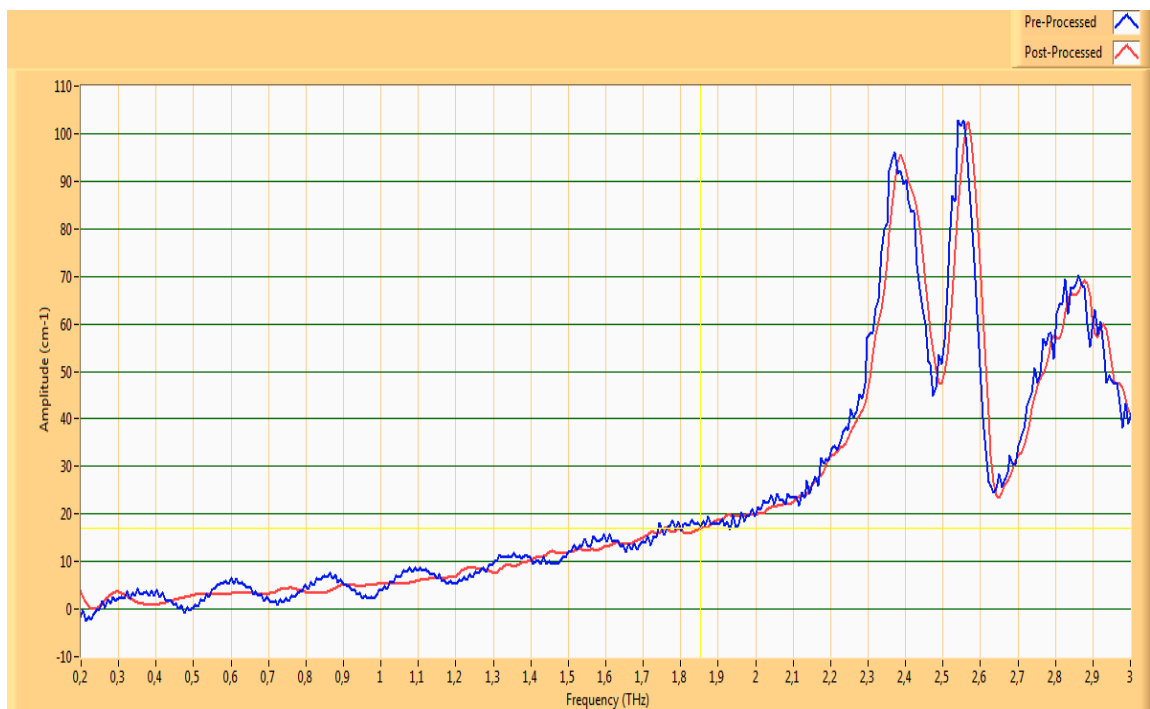
Índice de refracción y coeficiente de absorción de la galactosa con oscilaciones (Azul) y sin oscilaciones, eliminadas por cancelación de eco (Rojo) y por el término Fabry-Perot (Verde).

Ácido Nicotínico

Manualmente se midió un grosor de 380 μm y con el programa 382 μm . En este caso la cancelación de las oscilaciones se ha realizado aplicando el término Fabry-Perot.

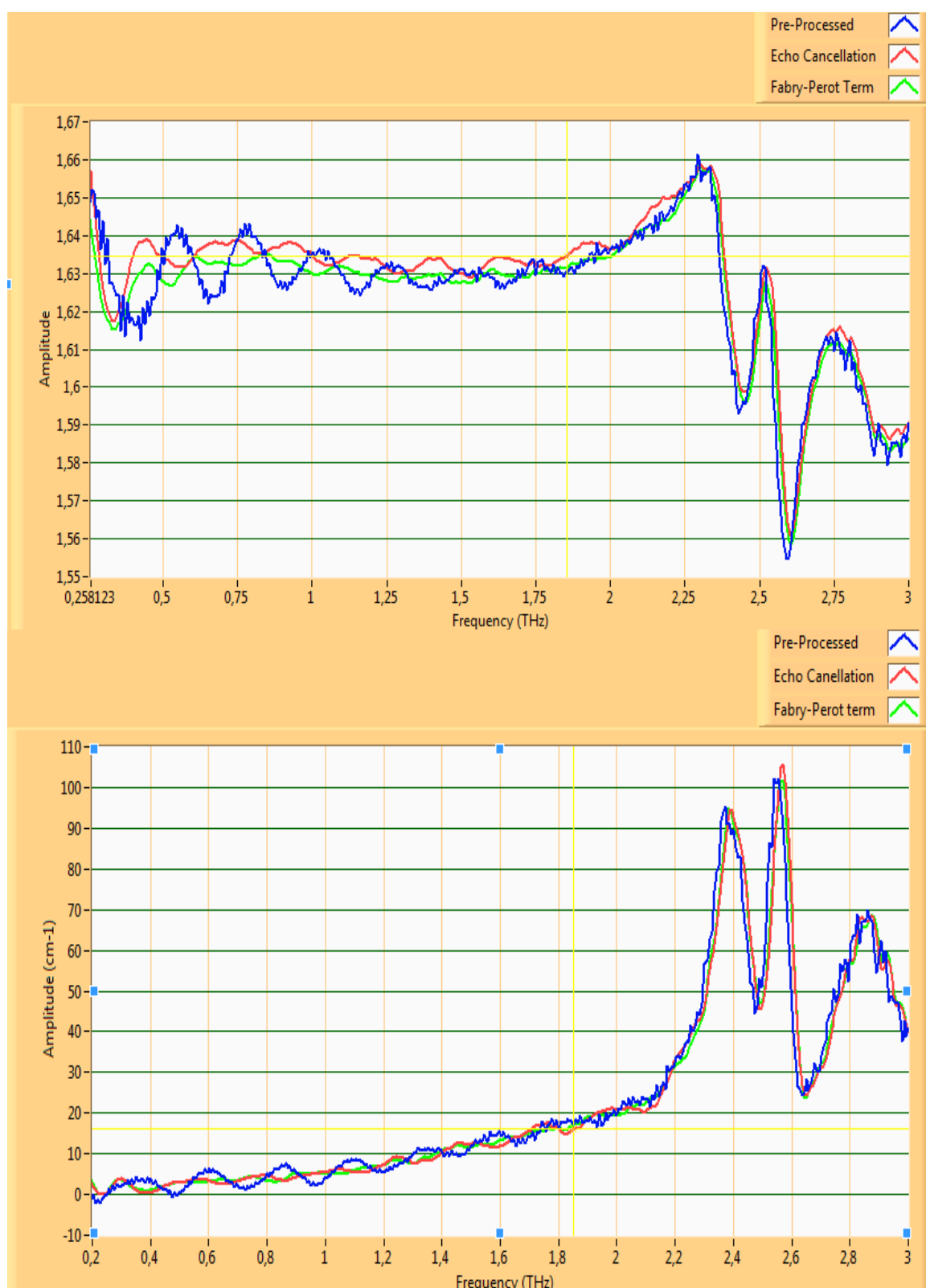


Índice de refracción de ácido nicotínico



Coefficiente de absorción del ácido nicotínico.

En estas gráficas aparecen los parámetros de los coeficientes del ácido nicotínico tanto con ondulaciones, como corregidos por los dos métodos vistos en este trabajo.



Índice de refracción y coeficiente de absorción del ácido nicotínico con oscilaciones (Azul) y sin oscilaciones, eliminadas por cancelación de eco (Rojo) y por el término Fabry-Perot (Verde).

10.2 Anexo II. Especificaciones del Lock-In Amplifier

Features & Specifications

The SR810 Lock-In Amplifier and SR830 Lock-In Amplifier provide high performance at a reasonable cost. The SR830 simultaneously displays the magnitude and phase of a signal, while the SR810 displays magnitude only. Both instruments use digital signal processing (DSP) to replace the demodulators, output filters, and amplifiers found in conventional lock-ins. The SR810 and SR830 provide uncompromised performance with an operating range of 1 mHz to 102 kHz and 100 dB of drift-free dynamic reserve.

Input Channel

The SR810 and SR830 Lock-In Amplifiers have differential inputs with 6 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ input noise. The input impedance is 10 M Ω , and minimum full-scale input voltage sensitivity is 2 nV. The input can also be configured for current measurements with selectable current gains of 10^6 and 10^8 V/A. A line filter (50 Hz or 60 Hz) and a 2x line filter (100 Hz or 120 Hz) are provided to eliminate line related interference. However, unlike conventional lock-in amplifiers, no tracking band-pass filter is needed at the input. This filter is used by conventional lock-ins to increase dynamic reserve. Unfortunately, band pass filters also introduce noise, amplitude and phase error, and drift. The DSP based design of these lock-ins has such inherently large dynamic reserve that no tracking band-pass filter is needed.

Extended Dynamic Reserve

The dynamic reserve of a lock-in amplifier at a given full-scale input voltage is the ratio (in dB) of the largest interfering signal to the full-scale input voltage. The largest interfering signal is defined as the amplitude of the largest signal at any frequency that can be applied to the input before the lock-in cannot measure a signal with its specified accuracy.

Conventional lock-in amplifiers use an analog demodulator to mix an input signal with a reference signal. Dynamic reserve is limited to about 60 dB, and these instruments suffer from poor stability, output drift, and excessive gain and phase error. Demodulation in the SR810 Lock-In Amplifier and SR830 Lock-In Amplifier is accomplished by sampling the input signal with a high-precision A/D converter, and multiplying the digitized input by a synthesized reference signal. This digital demodulation technique results in more than 100 dB of true dynamic reserve (no prefiltering) and is free of the errors associated with analog instruments.

Digital Filtering

The digital signal processor also handles the task of output filtering, allowing time constants from 10 μsec to 30,000 s, with a choice of 6, 12, 18 and 24 dB/oct rolloff. For low frequency measurements (below 200 Hz), synchronous filters can be engaged to notch out multiples of the reference frequency. Since the harmonics of the reference have been eliminated (notably 2F), effective output filtering can be achieved with much shorter time constants.

Digital Phase Shifting

Analog phase shifting circuits have also been replaced with a DSP calculation. Phase is measured with 0.01° resolution, and the X and Y outputs are orthogonal to 0.001°.

Frequency Synthesizer

The built-in direct digital synthesis (DDS) source generates a very low distortion (-80 dBc) reference signal. Single frequency sine waves can be generated from 1 mHz to 102 kHz with 4½ digits of resolution. Both frequency and amplitude can be set from the front panel or from a computer. When using an external reference, the synthesized source is phase locked to the reference signal.

Auto Functions

Auto-functions allow parameters that are frequently adjusted to automatically be set by the instrument. Gain, phase, offset and dynamic reserve are each quickly optimized with a single key press. The offset and expand features are useful when examining small fluctuations in a measurement. The input signal is quickly nulled with the auto-offset function, and resolution is increased by expanding around the relative value by up to 100x. Harmonic detection is no longer limited to only the 2F component. Any harmonic (2F, 3F, ... nF) up to 102 kHz can now be measured without changing the reference frequency.

Analog Inputs and Outputs

Both instruments have a user-defined output for measuring X, R, X-noise, Aux1, Aux 2, or the ratio of the input signal to an external voltage. The SR830 has a second, user-defined output that measures Y, Θ , Y-noise, Aux 3, Aux 4 or ratio. The SR810 and SR830 both have X and Y analog outputs (rear panel) that are updated at 256 kHz. Four auxiliary inputs (16-bit ADCs) are provided for general purpose use—like normalizing the input to source intensity fluctuations. Four programmable outputs (16-bit DACs) provide voltages from -10.5 V to +10.5 V and are settable via the front panel or computer interfaces.

Internal Memory

The SR810 Lock-In has an 8,000 point memory buffer for recording the time history of a measurement at rates up to 512 samples/s. The SR830 has two 16,000 point buffers to simultaneously record two measurements. Data is transferred from the buffers using the computer interfaces. A trigger input is also provided to externally synchronize data recording.

Easy Operation

The SR810 Lock-In Amplifier and SR830 Lock-In Amplifier are simple to use. All instrument functions are set from the front-panel keypad, and a spin knob is provided to quickly adjust parameters. Up to nine different instrument configurations can be stored in non-volatile RAM for fast and easy instrument setup. Standard RS-232 and GPIB (IEEE-488.2) interfaces allow communication with computers. All functions can be controlled and read through the interfaces.

Specifications

Signal Channel

Voltage inputs	Single-ended or differential
Sensitivity	2 nV to 1 V
Current input	10^6 or 10^8 V/A
Input impedance	
Voltage input	10 M Ω + 25 pF, AC or DC coupled
Current input	1 k Ω to virtual ground
Gain accuracy	± 1 % (± 0.2 % typ.)
Noise	6 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz 0.13 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz (10^6 V/A) 0.013 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 100 Hz (10^8 V/A)
Line filters	50/60 Hz and 100/120 Hz (Q=4)
CMRR	100 dB at 10 kHz, decreasing by 6 dB/oct above 10 kHz
Dynamic reserve	>100 dB (without prefilters)
Stability	<5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$

Reference Channel

Frequency range	0.001 Hz to 102.4 kHz
Reference input	TTL or sine (400 mVpp min.)
Input impedance	1 M Ω , 25 pF
Phase resolution	0.01° front panel, 0.008° through computer interfaces
Absolute phase error	<1°
Relative phase error	<0.001°
Orthogonality	90° \pm 0.001°
Phase noise	
Int. reference	Synthesized, <0.0001°rms at 1 kHz
Ext. reference	0.005°rms at 1 kHz, 100 ms, 12 dB/oct
Phase drift	<0.01°/°C below 10 kHz, <0.1°/°C, 10 kHz to 100 kHz
Harmonic detection	2F, 3F, ... nF to 102 kHz (n < 19,999)
Acquisition time	(2 cycles + 5 ms) or 40 ms, whichever is greater

Demodulator

Stability	Digital outputs and display: no drift. Analog outputs: <5 ppm/°C for all dynamic reserve settings.
Harmonic rejection	-90 dB
Time constants	10 μ s to 30 ks (6, 12, 18, 24 dB/oct rolloff). Synchronous filters available below 200 Hz.

Internal Oscillator

Range	1 mHz to 102 kHz
Accuracy	25 ppm + 30 μ Hz
Frequency resolution	4½ digits or 0.1 mHz, whichever is greater
Distortion	-80 dBc (f < 10 kHz), -70 dBc (f > 10 kHz) @ 1 Vrms amplitude
Amplitude	0.004 to 5 Vrms into 10 k Ω (2 mV resolution), 50 Ω output impedance, 50 mA maximum current into 50 Ω
Amplitude accuracy	1 %
Amplitude stability	50 ppm/°C
Outputs	Sine, TTL (When using an external reference, both outputs are phase locked to the external reference.)

Displays

Channel	4½-digit LED display with 40-segment LED bar graph. X, R, X-noise, Aux 1 or Aux 2. The display can also be any of these quantities divided by Aux 1 or Aux 2.
Channel 2 (SR830)	4½-digit LED display with 40-segment LED bar graph. Y, Θ , Y-noise, Aux 3 or Aux 4. The display can also be any of these quantities divided by Aux 3 or Aux 4.
Offset	X, Y, R can be offset up to ± 105 % of full scale.
Expand	X, Y, R can be expanded by 10x or 100x.
Reference	4½-digit LED display

Inputs and Outputs

CH1 output	± 10 V output of X, R, X-noise, Aux 1 or Aux 2. Updated at 512 Hz.
CH2 output (SR830)	± 10 V output of Y, Θ , Y-noise, Aux 3 or Aux 4. Updated at 512 Hz.
X, Y outputs (rear panel)	In-phase and quadrature components (± 10 V), updated at 256 kHz
Aux. A/D inputs	4 BNC inputs, ± 10 V, 1 mV resolution, sampled at 512 Hz
Aux. D/A outputs	4 BNC outputs, ± 10 V, 1 mV resolution
Sine Out	Internal oscillator analog output
TTL Out	Internal oscillator TTL output
Data buffer	The SR810 has an 8k point buffer. The SR830 has two 16k point buffers. Data is recorded at rates to 512 Hz and read through the computer interfaces.
Trigger In (TTL)	Trigger synchronizes data recording
Remote pre-amp	Provides power to the optional SR550, SR552 and SR554 preamplifiers

General

Interfaces	IEEE-488.2 and RS-232 interfaces standard. All instrument functions can be controlled and read through IEEE-488.2 or RS-232 interfaces.
Power	40 W, 100/120/220/240 VAC, 50/60 Hz
Dimensions	17" x 5.25" x 19.5" (WHL)
Weight	23 lbs.
Warranty	One year parts and labor on defects in materials and workmanship

10.3 Anexo III. Especificaciones de la Línea de Desplazamiento

Model	M-511.DD / M-521.DD / M-531.DD
Motion and positioning	
Travel range	102 / 204 / 306
Integrated sensor	Linear encoder
Sensor resolution	0.1 μ m
Design resolution	0.1
Min. incremental motion	0.1
Unidirectional repeatability	± 0.1
Bidirectional repeatability	± 0.2
Backlash	–
Pitch/Yaw	± 25 / ± 35 / ± 50
Straightness/Flatness per 100 mm	1
Max. velocity	50
Mechanical properties	
Thread pitch	2
Gear ratio	–
Motor resolution*	–
Max. load	1000
Max. push/pull force	80 / 80
Max. lateral force	200
Drive properties	
Motor type	ActiveDrive™ DC Motor
Operating voltage	24 (PWM)
Electrical power	30
Limit and reference switches	Hall-effect
Miscellaneous	
Operating temperature range	-20 to +65
Material	Al (black anodized)
Mass	5 / 6.1 / 7.2
Recommended controller/driver	C-863 (single-axis) C-843 PCI board (up to 4 axes)